

## Resum

En aquest projecte s'ha realitzat un estudi sobre la possibilitat d'utilitzar l'hidrogen com a vector energètic per a l'electrificació de dues vivendes rurals situades a Catalunya amb condicions climàtiques diferents. Per tal de produir hidrogen s'ha optat per la utilització d'energia eòlica i solar fotovoltaica, tot combinant les dues tecnologies amb la intenció d'obtenir la millor solució energètica. L'energia sobrant no consumida per les vivendes es converteix en hidrogen, per tal de ser emmagatzemada i produir energia elèctrica a través d'una pila de combustible en aquelles situacions en que la demanda d'electricitat sigui superior a la que pot oferir el sistema. A causa de les diferents condicions de les dues vivendes, una situada a Tarragona i l'altre al Berguedà, és possible analitzar com la variació de la superfície solar fotovoltaica o del diàmetre dels àleps de l'aerogenerador pot permetre la optimització dels resultats. Finalment, l'estudi mostra la reducció d'emissions de diòxid de carboni que comportaria una instal·lació d'aquestes característiques en el seu impacte mediambiental.





# Sumari

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESUM</b>   | <b>1</b>  |
| <b>SUMARI</b>  | <b>3</b>  |
| <b>1. PREFACI</b>  | <b>5</b>  |
| 1.1. Origen del projecte.....  | 5         |
| 1.2. Motivació .....   | 5         |
| <b>2. INTRODUCCIÓ</b>  | <b>6</b>  |
| 2.1. Objectius del projecte .....                                    | 6         |
| 2.2. Abast del projecte .....  | 6         |
| <b>3. SITUACIÓ ENERGÈTICA ACTUAL</b>                                 | <b>7</b>  |
| 3.1. Context internacional .....                                     | 9         |
| 3.2. Context europeu .....   | 12        |
| 3.3. Context estatal .....   | 14        |
| <b>4. EL VECTOR ENERGÈTIC HIDROGEN</b>                               | <b>16</b> |
| 4.1. Avantatges i inconvenients de la tecnologia de l'hidrogen ..... | 17        |
| 4.1.1. Avantatges.....   | 17        |
| 4.1.2. Inconvenients.....  | 19        |
| 4.2. L'economia de l'hidrogen.....                                   | 20        |
| <b>5. ESTAT DE L'ENERGIA EÒLICA A CATALUNYA</b>                      | <b>22</b> |
| 5.1. Situació actual.....  | 22        |
| 5.2. Generació d'energia eòlica.....                                 | 23        |
| 5.3. Perspectives de futur .....                                     | 24        |
| <b>6. SITUACIÓ DE L'ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA A CATALUNYA</b>       | <b>26</b> |
| 6.1. Situació actual.....  | 26        |
| 6.2. Generació d'energia solar fotovoltaica .....                    | 28        |
| 6.3. Perspectives de futur .....                                     | 29        |
| <b>7. DISSENY DE LA INSTAL·LACIÓ</b>                                 | <b>31</b> |
| 7.1. Plaques solars .....  | 32        |
| 7.2. Aerogenerador .....   | 34        |
| 7.3. Convertidor de tensió.....                                      | 36        |



|   |           |
|---|-----------|
| 7.4. Electrolitzador .....  | 37        |
| 7.5. Compressor.....  | 37        |
| 7.6. Dipòsit d'alta pressió.....                                  | 37        |
| 7.7. Pila de combustible.....                                     | 38        |
| 7.8. Inversor.....  | 38        |
| 7.9. Unitat de gestió .....                                       | 39        |
| 7.10. Detector de pressió.....                                    | 39        |
| 7.11. Detector d'hidrogen.....                                    | 39        |
| 7.12. Electrovàlvules .....                                       | 39        |
| 7.13. Regulador de pressió.....                                   | 40        |
| 7.14. Filtres d'oli .....   | 40        |
| <b>8. DIMENSIONAT DE LA INSTAL·LACIÓ _____</b>                    | <b>41</b> |
| <b>9. ESTUDI ALTERNATIU – INSTAL·LACIÓ AMB CALDERA DE GAS ___</b> | <b>62</b> |
| <b>10. VIABILITAT ECONÒMICA _____</b>                             | <b>68</b> |
| <b>11. ESTUDI D'IMPACTE AMBIENTAL _____</b>                       | <b>77</b> |
| <b>CONCLUSIONS _____</b>  | <b>81</b> |
| <b>AGRAÏMENTS _____</b>   | <b>83</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA _____</b>   | <b>84</b> |



# 1. Prefaci

## 1.1. Origen del projecte

La voluntat de realitzar un projecte de fi de carrera basat en les possibilitats energètiques actuals de l'hidrogen sorgeix d'un informe realitzat a l'assignatura Tecnologia Energètica de cinquè curs de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona, en col·laboració amb altres companys i tutoritzat per Jordi Llorca. L'informe realitzat "Generació d'hidrogen per electròlisi a partir d'energia eòlica. Aplicació a un parc eòlic de Catalunya", era un estudi sobre les possibilitats d'implantació de sistemes de generació d'hidrogen a prop de parcs eòlics, per tal de subministrar energia a una xarxa d'autobusos de la comarca de l'Anoia.

## 1.2. Motivació

La necessitat energètica que es viu actualment va ser la que va propiciar realitzar un estudi sobre les diferents alternatives que existeixen als combustibles fòssils actualment. Aquest fet, i la gran importància que està prenent l'hidrogen actualment van fer possible la realització d'aquest projecte de fi de carrera.



## 2. Introducció

En aquest projecte s'ha intentat mostrar de manera específica com es poden solucionar alguns dels problemes energètics davant dels quals ens trobem. De manera global es comenta la situació energètica mundial, fent referència a la necessitat de trobar noves solucions energètiques que permetin la reducció de les emissions de diòxid de carboni i evitin l'esgotament dels combustibles fòssils; mentre que de forma específica, el projecte es centra en la utilització de l'hidrogen com a vector energètic en vivendes rurals.

### 2.1. Objectius del projecte

El principal objectiu del projecte és donar evidència de la possibilitat de trobar solucions energètica i mediambientalment possibles, sense la necessitat de la intervenció dels combustibles fòssils. Per aquest motiu, l'estudi s'ha basat en poder proporcionar energia de forma sostenible i energèticament estable a vivendes rurals.

Entre els objectius principals de l'estudi també es troba la necessitat de donar a conèixer les possibilitats energètiques actuals de l'hidrogen, així com l'elevat cost de la seva tecnologia, encara en vies de desenvolupament.

### 2.2. Abast del projecte

Tal i com s'ha comentat als apartats anteriors, el projecte es centra en l'electrificació de dues vivendes rurals, l'una situada al Berguedà i l'altre a la comarca de Tarragona. Les dues vivendes escollides no tenen accés actualment a la xarxa elèctrica i realitzen l'abastiment energètic a partir de motors Diesel estacionaris. Per aquest motiu i aprofitant les possibilitats actuals de desenvolupament de les energies renovables, es realitza una instal·lació combinant les energies solars fotovoltaica i eòlica, per a la producció d'energia elèctrica, tot acumulant els excedents energètics que es produeixin en forma d'hidrogen, per tal de ser utilitzat en aquells casos en els quals la demanda d'energia sigui superior a la capacitat productiva del sistema combinat d'energia solar i eòlica.



### 3. SITUACIÓ ENERGÈTICA ACTUAL

Actualment, el sistema energètic mundial està dominat per les energies de dipòsits no renovables (fòssils), que cobreixen el 85% del consum d'energia primària, envers un 6,5% de l'energia generada per reacció nuclear, un 6,5% l'energia hidroelèctrica i un 1,3% les altres energies capturades (renovables).

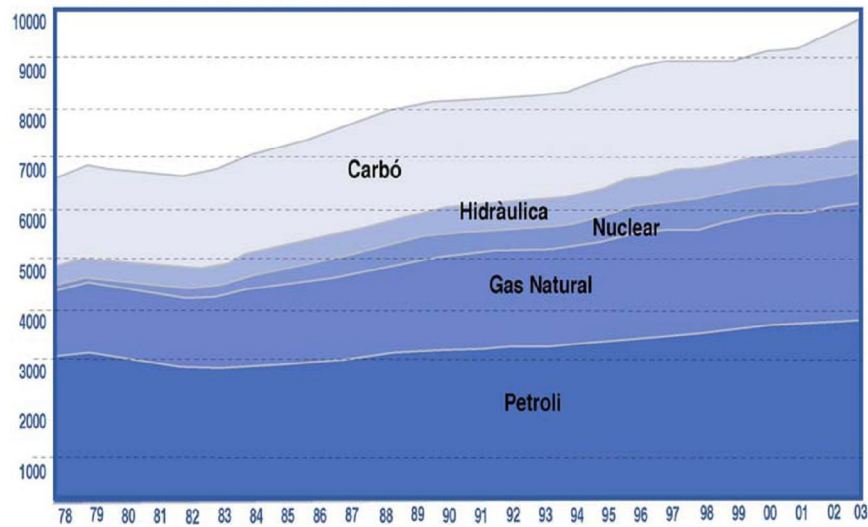


Fig. 3.1. Evolució del consum mundial d'energia primària (Font: *Energy Information Administration, EIA 2002*)

El petroli és el més conegut d'entre els recursos naturals d'origen fòssil. En el decurs del segle XX el petroli va desplaçar a d'altres fonts energètiques com el carbó o l'energia hidràulica i va impulsar la utilització generalitzada dels motors de combustió interna en els transports i el desenvolupament d'una nova indústria química que permetia obtenir tota mena de productes. Tots aquests factors van fer que el consum de petroli augmentés ràpidament fins esdevenir un recurs fonamental per a l'economia mundial, tant pel moviment de capital que implicava el seu comerç a nivell mundial com per la seva contribució al benestar de les societats desenvolupades, gràcies a la possibilitat de transformar-lo en productes com ara els plàstics, les fibres sintètiques, els asfalts, els productes farmacèutics, la benzina i el gas-oil, entre d'altres, els quals resulten imprescindibles per a la nostra societat.

Aquesta forta dependència del petroli ha fet que aquest recurs s'hagi explotat molt intensament en els darrers 50 anys. En només 14 anys, que van des del 1965 al 1979, la producció mundial de petroli es va duplicar, passant de 1.566 a 3.233 milions de tones anuals. Després de la crisi del petroli d'aquell any, la producció va patir una certa davallada, recuperant l'any 1994 el nivell de producció de l'any 1979.



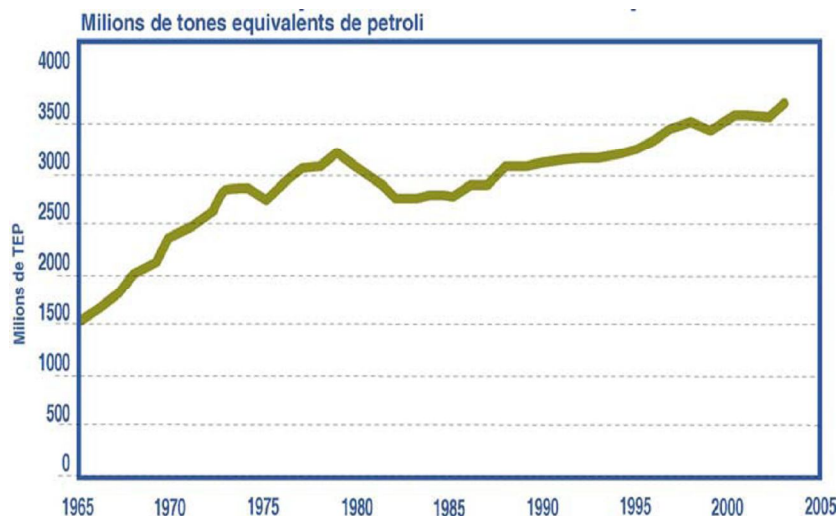


Fig. 3.2. Evolució de la producció mundial de petroli (Font: *BP Statistical Review of World Energy*)

Quant a la demanda global d'energia a nivell mundial, un terç la consumeix el sector industrial, un terç el sector del transport (que és el que més ha crescut les darreres dècades) i un terç els sectors residencial, terciari i primari. La intensitat energètica ha disminuït progressivament als països occidentals els darrers anys, a un ritme d'un 1,4% anual; una baixada no simultània a tots els països occidentals, ja que Catalunya, entre d'altres, ha vist créixer la seva intensitat energètica els darrers anys, sobretot en els sectors terciari i transport.

Malgrat la incertesa i les diferents opinions respecte de quan es produirà l'esgotament del petroli o de quan els preus començaran a augmentar com a resultat d'aquesta incertesa, cal preparar-se per afrontar aquesta situació i intentar obrir-se pas a través de les energies renovables.

Malgrat això, actualment no totes les energies renovables es troben en el mateix punt d'evolució. L'energia hidroelèctrica, per exemple, ja ha arribat a la maduresa tecnològica i ha assolit la major part del seu potencial a Catalunya. L'energia eòlica és la que actualment presenta unes majors possibilitats, ja que aquesta tecnologia es troba ja en la fase de desenvolupament del seu potencial, una vegada ha superat les fases de R+D. La solar tèrmica, els aprofitaments energètics de la biomassa agrícola i forestal i els biocombustibles també són tecnologies que estan gairebé preparades per iniciar la seva penetració en el mercat.

El cas de la solar fotovoltaica, tot i ser una tecnologia que està en plena evolució tecnològica, per algunes aplicacions ja es troba en una fase prou avançada d'aproximació al mercat, però encara necessita suport econòmic i financer per aconseguir la viabilitat. Malgrat això, tenint en compte el potencial que té i la importància que pot tenir aquesta font energètica en el futur, es considera imprescindible continuar donant aquest suport al desenvolupament d'aquesta tecnologia i a la seva penetració en el mercat.

Cal avançar en el camí del foment d'aquestes energies de manera sincronitzada amb l'estratègia d'estalvi i eficiència energètica ja que aquests àmbits són complementaris: cal impulsar les fonts energètiques renovables fins al seu màxim potencial però, al mateix temps, reduir les necessitats





energètiques de la societat a uns valors que permetin que les energies renovables en siguin la component principal.

### 3.1. Context internacional

Després d'una dècada de relativa estabilitat, el mercat internacional de l'energia s'ha vist recentment sacsejat per diversos elements nous que han entrat en escena:

- ❑ El fort increment dels preus del petroli durant els anys 2004-2005 i els dubtes que sorgeixen sobre si la producció podrà seguir el ritme de creixement de la demanda.
- ❑ L'entrada en vigor del Protocol de Kyoto, la posada en marxa del mercat de drets d'emissió i, com a conseqüència, el potencial impacte sobre els costos dels combustibles fòssils.
- ❑ El reconeixement, cada cop més generalitzat, del dret d'accés a l'energia comercial de gairebé un terç de la població mundial sense aquest servei bàsic.

Els preus mitjans del petroli en el període 2003-2004 han estat els més alts dels darrers vint anys. Cal tenir en compte que un cop corregit per la inflació, aquest preu és encara un 35% inferior al de l'any 1980. Aquesta escalada del preu del petroli ha estat provocada per:

- ❑ Un fort increment del consum d'aquest combustible, particularment a la Xina, l'Índia i als Estat Units. En efecte, el consum mundial de petroli va créixer l'any 2003 en un 2,1%, el valor més elevat des de 1999; però val a dir que el 40% d'aquest augment, és a dir, 600.000 barrils al dia, va correspondre a la Xina. De la mateixa manera, durant els darrers cinc anys, la Xina ha estat la responsable d'un terç de l'increment mundial de la demanda d'energia primària, del 35% del de la producció d'electricitat i del 60% de l'augment de consum de carbó mundial.
- ❑ La falta d'inversions, especialment per augmentar la capacitat d'extracció i en el refinat
- ❑ La inestabilitat política i social de bona part dels països productors.

Podria pensar-se que aquesta pujada de preus del petroli és conjuntural, però no sembla probable que la demanda de petroli tendeixi a moderar-se en un futur immediat, ni cal esperar importants augments de la producció, especialment quan, en algunes regions, s'està arribant a la màxima capacitat d'extracció; tampoc està prevista una entrada en servei important de noves explotacions.

Segons les projeccions de l'Agència Internacional de l'Energia, entre 1997 i 2020, la demanda mundial d'energia primària s'incrementarà un 57% i, al final d'aquest període, els combustibles fòssils encara representaran el 80% del consum d'energia global. D'una altra banda, els augments de producció són complicats en termes del volum d'inversions que cal mobilitzar i dels terminis que cal preveure des de la presa de decisions fins a l'entrada en servei de les infraestructures d'explotació. Pel que fa a les noves tecnologies d'exploració i les d'explotació que permeten explotar de forma rendible



alguns jaciments no convencionals, encara es trigaran uns quants anys en arribar a la seva fase de maduresa comercial. Així mateix, cal tenir en compte que la meitat de les reserves de petroli es troben en països de l'Orient Mitjà i el 77% en països de l'OPEP. També, en el cas de gas natural, gairebé la meitat de les reserves es concentren en dos països: Iran i Rússia. Això implica que la major part de països desenvolupats i en desenvolupament que són importadors d'energia han de confiar en un reduït grup de països, molts d'ells amb una marcada inestabilitat política, per garantir el seu subministrament de combustibles fòssils.

Tanmateix, malgrat les possibles tensions que es poden produir en el mercat i la intensa explotació a que han estat sotmesos els recursos energètics convencionals, no es preveu una crisi per manca de combustibles fòssils a curt termini. De fet, la proporció reserves/producció de combustibles fòssils - que indiquen el període d'exhauriment de les reserves amb el ritme de consum actual - mesurada en anys, mostra com les reserves de petroli, que és el combustible amb un termini més curt, encara poden garantir el subministrament durant els 41 anys vinents. En relació a les reserves de gas natural, es calcula que al ritme de producció actual resten reserves per a uns 67 anys, mentre que el carbó es situa com la font d'energia més abundant amb un índex R/P (Reserves/Producció) de 192 anys.

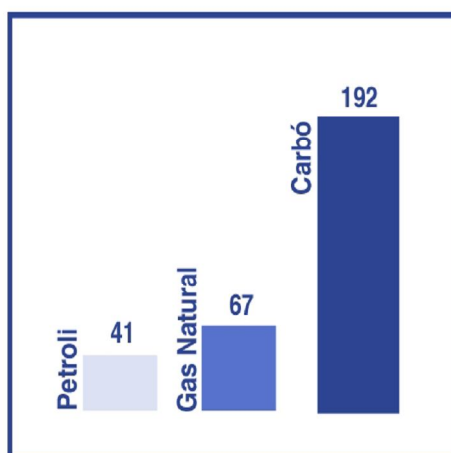


Fig. 3.1.1. Rati R/P (reserves/producció) dels diferents combustibles fòssils al món, mesurada en anys (any 2003)  
(Font: BP Statistical Review, 2004)

El problema radica en què els combustibles fòssils suposen actualment més del 80% del consum mundial d'energia primària i que, segons coincideixen a assenyalar la majoria dels analistes, encara podrien augmentar la seva participació dins la demanda global d'energia. Per tant, el fet de consumir uns recursos essencials per a tota activitat econòmica a un cost més elevat pot tenir efectes negatius sobre el creixement econòmic. Especialment, en aquells països que, com la major part dels europeus, presenten una forta dependència de les importacions energètiques.



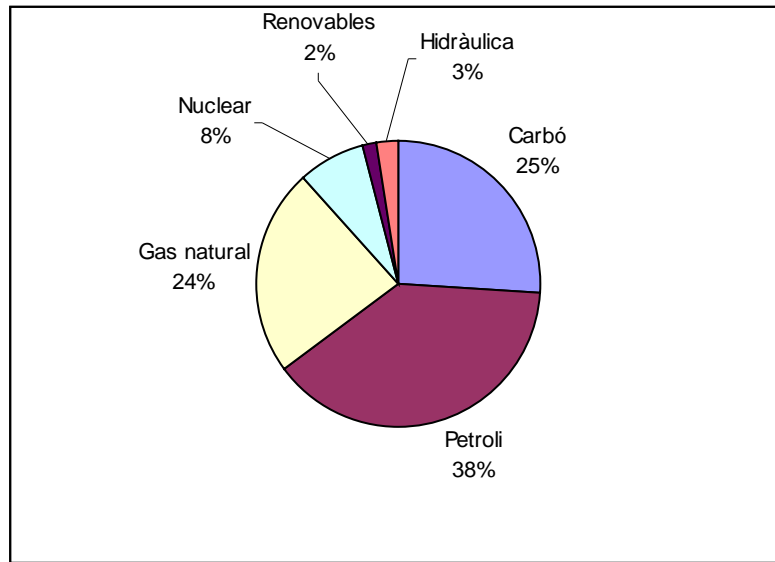


Fig. 3.1.2. Consum mundial d'energia primària per tipus de font energètica (any 2002) (Font: Agència Internacional de l'Energia (OCDE))

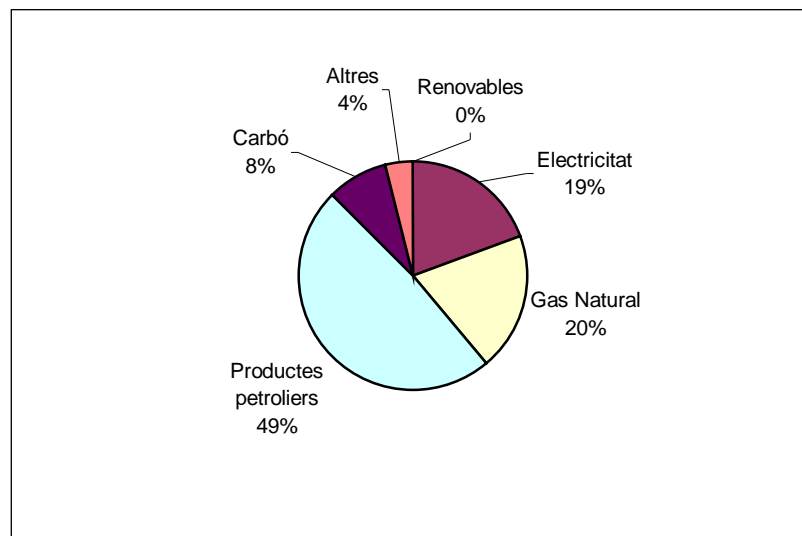


Fig. 3.1.3. Consum mundial d'energia final per tipus de font energètica (any 2002) (Font: Agència Internacional de l'Energia (OCDE))

Per tant, aquest escenari fa que l'eficiència energètica, amb avenços discrets en el decurs de la darrera dècada, i el desenvolupament de les fonts d'energia renovables hagin de cobrar un protagonisme creixent a curt i mig termini dins les polítiques dels països desenvolupats com a factors estratègics, per reforçar les garanties d'un subministrament energètic més diversificat i més estable. En aquesta línia, cal assenyalar els esforços que alguns països europeus estan realitzant per a potenciar les energies renovables i augmentar la seva participació en el seus respectius sistemes energètics. A més, la tendència a l'alça dels preus dels combustibles convencionals canviarà els paràmetres de comparació de costos entre fonts renovables i convencionals.



## 3.2. Context europeu

La política energètica de la Unió Europea (UE) contempla actualment dos grans objectius: garantir la seguretat en el proveïment d'energia i completar el desenvolupament del mercat únic de l'energia, respectant alhora els objectius de la pròpia política mediambiental europea, en particular els compromisos derivats del protocol de Kyoto.

El primer objectiu fou presentat en el *Llibre verd sobre seguretat d'abastament energètic*, aprovat en la seva versió final el juny de 2002, que pretén garantir la seguretat de l'abastament energètic a un preu assequible a tots els consumidors, avançar en el desenvolupament sostenible, així com també mantenir la competitivitat del mercat europeu en aquest sector. L'anàlisi de la situació energètica actual a la Unió Europea que contempla el Llibre Verd mostra les següents conclusions:

- ❑ El subministrament d'energia de la UE és cada cop més depenent de les importacions de recursos externs.
- ❑ El marge de maniobra per actuar sobre l'oferta d'energia és molt reduït i, per tant, cal concentrar-se en accions sobre la demanda.
- ❑ Sense una acció decidida, la UE no serà capaç d'assolir els compromisos adoptats en el protocol de Kyoto.

El petroli és la font energètica que cobreix la major part de les necessitats de la UE, amb més del 45% l'any 2002 (energia final). La major part d'aquest consum es concentra en el sector transports, que és el principal consumidor d'energia a Europa amb una participació del 31% en el consum final. El gas natural ha esdevingut el segon recurs més utilitzat, amb una participació creixent any rera any, essencialment en la producció elèctrica, arribant al 24%. Finalment, el carbó suposa el 15%.

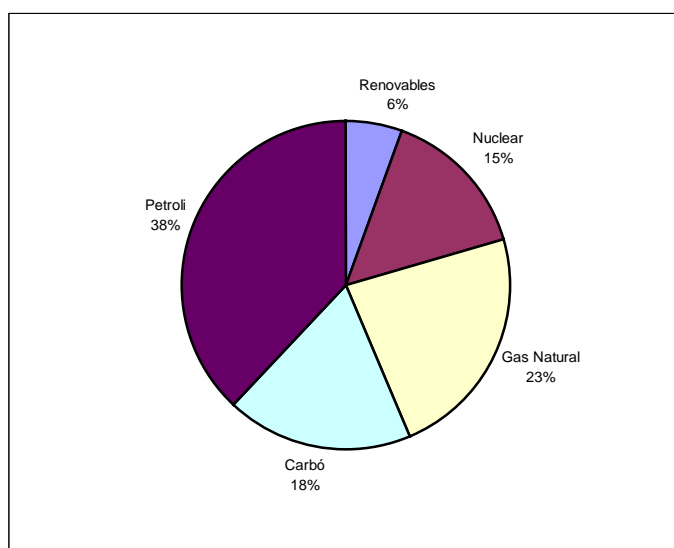


Fig. 3.2.1. Demanda d'energia primària a la Unió Europea (any 2002) (Font: EUROSTAT)



La Unió Europea és deficitària en la producció de tots aquests tres combustibles fòssils. Actualment, la dependència exterior de la UE en matèria energètica es situa al voltant del 50%, però es preveu que la reducció de la producció de fonts d'energia primàries pròpies, juntament amb a l'augment de consum d'aquests recursos, faci augmentar la dependència fins el 65% el 2030.

Aquesta situació presenta uns riscos importants per a la Unió, ja que, malgrat que aquesta depèn del mercat energètic internacional, encara no disposa de tots els mitjans per poder-hi exercir la seva influència. Per tant, és indispensable una diversificació de les fonts energètiques.

L'altre gran àmbit sobre el què la CE ha plantejat diverses iniciatives és el camp de les fonts d'energia renovables, un punt clau per a la diversificació del sector energètic i la protecció del medi ambient. La Unió Europea va definir en el *Llibre blanc* de 1997 l'estratègia i un pla d'actuació a escala europea per a la promoció de les fonts d'energia renovables, amb l'objectiu central de duplicar-ne el percentatge en el consum d'energia primària de la UE, fins a arribar a un 12% l'any 2010.

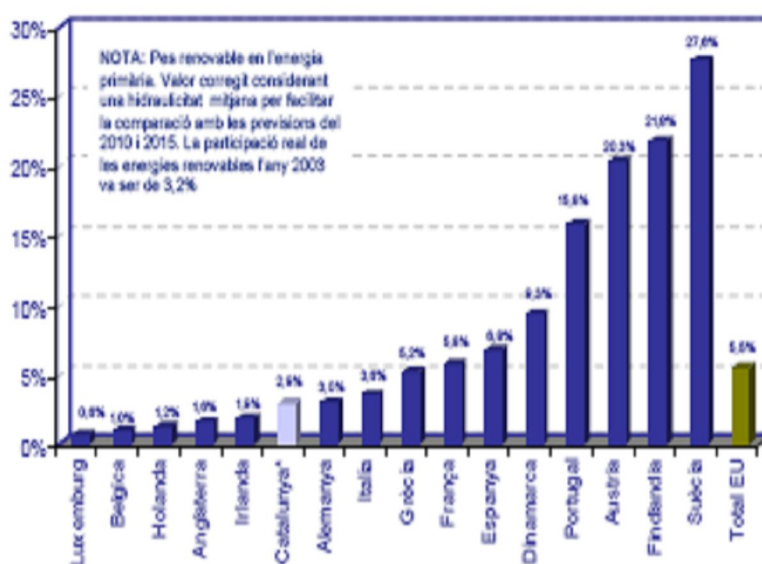


Fig. 3.2.2. Participació de les energies renovables en el consum d'energia primària a EU15 (any 2003) (Font: Le Baromètre Européen des Energies Renouvelables i Institut Català d'Energia)

La primera iniciativa legislativa de la CE en aquest camp fou la Directiva 2001/77/EC relativa a la producció d'electricitat amb energies renovables. La Directiva obliga a cada país a fixar uns objectius mínims de consum elèctric d'origen renovable, i també a introduir un sistema de certificació "verda" de l'electricitat produïda amb aquestes fonts, tot facilitant la incorporació al mercat d'aquesta energia. Gràcies a aquesta iniciativa, es preveu que l'any 2010 un 22% del consum de l'energia elèctrica a la Unió Europea procedirà de fonts d'energia renovable.



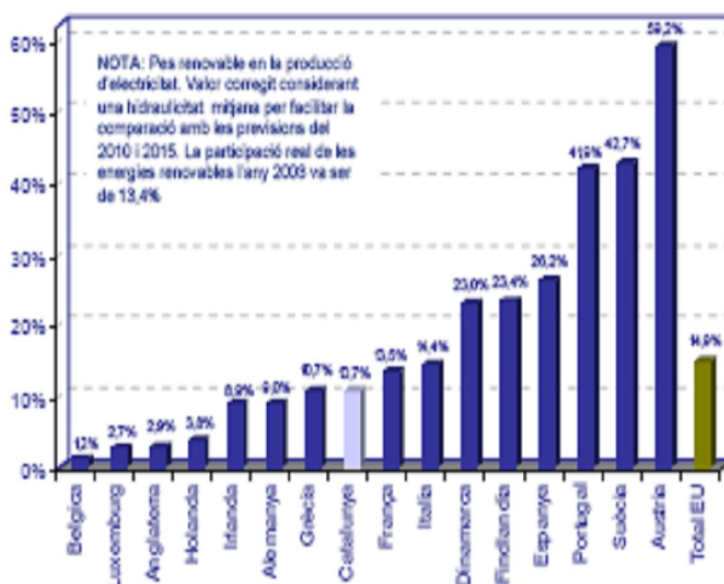


Fig. 3.2.3. Producció elèctrica amb fonts d'energia renovable a la UE15 (any 2002) (Font: Le Baromètre Européen des Energies Renouvelables i Institut Català d'Energia)

**TOTAL: 2678 TWh**

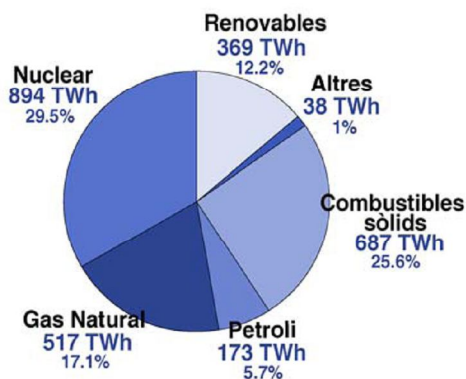


Fig. 3.2.4. Producció elèctrica per font energètica a la UE (any 2002) (Font: DG TREN - Comissió Europea)

### 3.3. Context estatal

Un dels trets característics de l'energia a l'Estat espanyol és el fort increment de la demanda d'energia primària: actualment es consumeixen a l'Estat espanyol 132 milions de tep, gairebé el doble que vint anys enrera.

Un altre canvi important en el panorama energètic estatal, durant el darrer quart de segle, és el relatiu a la diversificació de les fonts de subministrament energètic. El petroli ha passat de cobrir el 70% de les necessitats energètiques a representar, aproximadament, el 50% del consum d'energia



primària. Contràriament, el gas natural ha passat de ser un recurs amb una participació marginal com a font primària (1,5% del consum el 1975) a cobrir al voltant del 15,6% del consum d'energia primària l'any 2003, i es presenta com la font amb les majors perspectives de creixement a mig termini. Per la seva banda, l'energia nuclear, amb una participació molt reduïda l'any 1975, representa actualment el 13%; i el carbó, que ha reduït la seva aportació, representa el 17% del consum primari. Finalment, les energies renovables, que actualment representen al voltant del 6% del consum d'energia primària, han augmentat en valor absolut la seva aportació i han diversificat el seu origen, especialment en la darrera dècada.

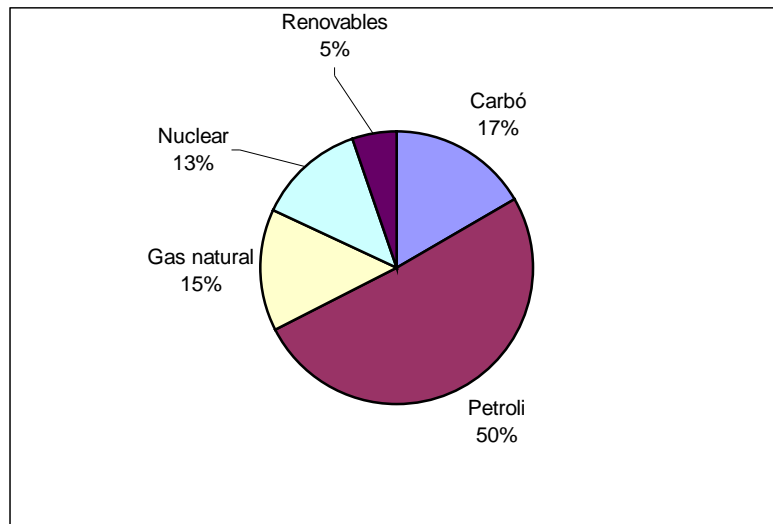


Fig. 3.3.1. Consum d'energia primària a l'Estat espanyol (any 2002) (Font: EUROSTAT)

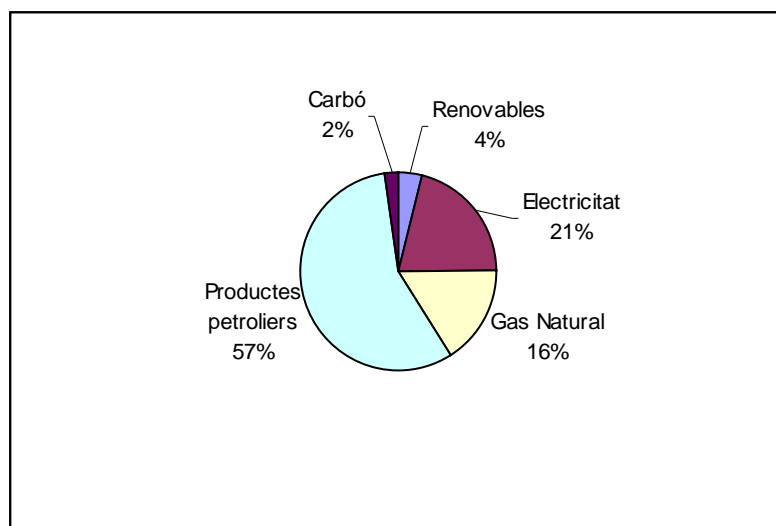


Fig. 3.3.2. Consum d'energia final a l'Estat espanyol (any 2002) (Font: EUROSTAT)



## 4. EL VECTOR ENERGÈTIC HIDROGEN

Robert Boyle, al 1671, fou el primer en considerar “l'aire” que es despenia de les reaccions produïdes entre àcids i determinats metalls com un element diferent de l'aire que respirem. Henry Cavendis, al 1766, va demostrar que es tractava d'un aire inflamable, ja que tenia la propietat d'incendiar-se a l'atmosfera produint aigua.

La interpretació d'aquestes experiències, i dels seus propis experiments, realitzada per Antoine Laurent de Lavoisier, li van permetre al seu Tractat Elemental de Química que l'aigua no és una substància simple, sinó que es troba formada per dos compostos: l'aire vital, l'oxigen, i aquest aire inflamable al que va anomenar hidrogen, “que produeix aigua”. A més, Lavoisier va desenvolupar un mètode per produir hidrogen en grans quantitats, mitjançant la dissociació de l'aigua amb un ferro escalfat.

Les propietats físiques i químiques de l'hidrogen han permès el desenvolupament de nombroses aplicacions industrials. La primera va ser a la navegació aèria, utilitzant-se com a gas per omplir els globus aerostàtics, aprofitant així la força ascensional deguda a la seva baixa densitat. Malgrat això, els germans Montgolfier el van substituir per aire escalfat, ja que l'hidrogen es perdia ràpidament per les primeres parets dels dispositius construïts.

A principis del segle XIX, l'hidrogen fou utilitzat com a font d'energia per a la il·luminació dels carrers de París per Philippe Lebon, formant el que avui s'anomena “gas de síntesi”, una barreja d'hidrogen i monòxid de carboni, desplaçant les làmpades d'oli i petroli utilitzades fins al moment.

El primer motor d'hidrogen, descrit per W. Cecil al 1820, es movia per la pressió de l'atmosfera sobre el buit causat per l'explosió d'una barreja d'hidrogen i aire. Entre els anys 1860 i 1879, N.A. Otto, inventor del cicle termodinàmic amb el seu nom, utilitza gas de síntesi com a combustible a un motor d'explosió per a automòbils, però el desenvolupament del carburador va imposar l'ús de la gasolina que havia sigut considerada més perillosa que el gas de síntesi inicialment. L'hidrogen també s'ha utilitzat com a matèria prima per la indústria química, per tal d'augmentar el rendiment dels motors de reacció i com a combustible per a coets.

El descobriment de la pila de combustible per William Robert Grove al 1839, va obrir noves possibilitats d'ús final per a l'hidrogen. La primera pila tenia elèctrodes de platí i utilitzava àcid sulfúric com electròlit, amb hidrogen i oxigen com a combustible, per tal de produir electricitat i aigua. Malgrat això, el desenvolupament de les màquines tèrmiques i les piles de combustible van disminuir l'interès per aquesta tecnologia.

Al 1953, Francis Thomas Bacon, va construir un prototipus de pila utilitzant hidrogen i oxigen amb un electròlit alcalí, en comptes d'electròlits àcids, i elèctrodes de níquel, més econòmics que els de platí utilitzats anteriorment, que fou la base per als dissenys utilitzats als programes Geminis i Apollo per General Electric. Actualment, la Llançadera Espacial de la NASA, utilitza piles de combustible per produir aigua potable i electricitat per a la tripulació.





Les primeres aplicacions en vehicles van ser realitzades als Estats Units amb piles alcalines, un tractor amb una pila de 15 kW i un automòbil que utilitzava una pila de 6 kW com a complement a un sistema de propulsió elèctric, el combustible era hidrogen a pressió i assolía una autonomia de 300 km.

La crisi del petroli del 1973 i la necessitat de buscar fonts alternatives d'energia i protegir el medi ambient, van impulsar les investigacions per aconseguir millors components de les piles, elèctrodes, electròlits i als sistemes perifèrics, compressors, intercanviadors, sistemes per emmagatzemar hidrogen.

## 4.1. Avantatges i inconvenients de la tecnologia de l'hidrogen

La World Meteorological Organization (WMO) i la United Nations Environment Programme (UNEP) han creat el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), l'objectiu principal del qual és l'estudi del canvi climàtic. Aquest comitè ha destacat l'hidrogen i les piles de combustible com factors clau per a controlar les emissions de gasos d'efecte hivernacle.

Aquesta tecnologia està millorant de forma vertiginosa i generant gran expectació entre científics i empresaris pel seu potencial de no emissió de diòxid de carboni (CO<sub>2</sub>) i la revolució que suposaria per a l'economia global. A continuació es comenten les diferents avantatges i inconvenients que suposa la utilització de la tecnologia de l'hidrogen.

### 4.1.1. Avantatges

#### □ Beneficis mediambientals

- *Altes eficiències en la utilització del combustible.*

El fet de que la conversió directa del combustible a energia sigui a través d'una reacció electroquímica, fa que les piles de combustible puguin produir més energia amb la mateixa quantitat de combustible si ho comparem amb una combustió tradicional. El procés directe fa que les eficiències puguin arribar fins a 30% i 90%, depenent del sistema de pila de combustible i a més es pot emprar la calor addicional produïda.

A les màquines tèrmiques, la generació d'energia basada en la combustió converteix prèviament el combustible en calor, limitant-se el procés a la llei de Carnot de la termodinàmica i després a energia mecànica, la qual produeix moviment o condueix a que les turbines produeixin energia. Els passos addicionals implicats en la combustió fan que l'energia escapi en forma de calor, fricció i altres pèrdues de conversió, provocant una disminució de l'eficiència del procés global.

Les piles de combustible al no ser màquines tèrmiques, el seu rendiment no està limitat pel cicle de Carnot i es pot arribar teòricament al 100%. Únicament les limitacions en l'aprofitament de l'energia generada i en els materials emprats en la seva construcció impedeixen arribar a aquest valor.



- *Emissió zero de contaminants.*

Quan el combustible és hidrogen, els productes obtinguts en la reacció electroquímica catalitzada de la pila de combustible entre l'hidrogen i l'oxigen són aigua, calor i electricitat, en lloc de diòxid de carboni, òxids de nitrogen, òxids de sofre i altres partícules inherents a la combustió de combustibles fòssils. Per a extreure hidrogen pur, els combustibles fòssils han de passar primer per un reformador. En aquest procés les emissions de diòxid de carboni, òxids de nitrogen, òxids de sofre i altres contaminants, són només una fracció d'aquells produïts en la combustió de la mateixa quantitat de combustible.

- *Reducció del perill mediambiental inherent de les indústries extractives.*

Les piles de combustible no produeixen la deterioració ambiental associada a l'extracció de combustibles fòssils de la Terra quan l'hidrogen és produït a partir de fonts renovables. Si es produeix un escapament d'hidrogen, aquest s'evaporarà de forma instantània degut al fet que és més lleuger que l'aire. Aquesta seria una solució per a pal·liar el dramàtic llegat que s'ha deixat en el nostre planeta a causa de les perforacions petrolíferes, el transport, el refinament i els productes de desfet associats.

- *Funcionament silencios.*

Al manca de parts mòbils, s'ha estimat que el nivell de soroll a 30 metres d'una pila de combustible de grandària mitja és únicament de 55 decibels. És per això que podrien ser utilitzades piles de combustible en recintes urbans.

- *Seguretat energètica*

L'hidrogen utilitzat com combustible en les piles de combustible pot ser produït a nivell domèstic a través del reformat de gas natural, electròlisi de l'aigua o fonts renovables com eòlica o fotovoltaica. La generació d'energia a aquest nivell evita la dependència de fonts estrangeres que poden localitzar-se en regions del món inestables.

El ràpid consum dels combustibles fòssils que la societat moderna requereix per a l'estat de vida actual està acabant amb un recurs limitat. La utilització de l'hidrogen, l'element més abundant en l'Univers, és il·limitada. La transició cap a una economia de l'hidrogen és possible i evitaria els problemes associats a l'esgotament del petroli.

- *Independència de la xarxa de subministrament energètic*

Un sistema de cel·les de combustible residencial, permet una independència als seus habitants respecte a la xarxa de subministrament elèctric, la qual pot tenir irregularitats. Una d'aquestes, serien els talls de corrent que poden causar danys importants a sistemes informàtics, a equips electrònics i en general a la qualitat de vida de les persones.

- *Piles de combustible front a bateries tradicionals*



Les cel·les de combustible ofereixen una reducció en el pes i en la grandària per a la mateixa quantitat d'energia disponible respecte a les bateries tradicionals. Per a incrementar l'energia en una pila de combustible, simplement ha d'introduir-se més quantitat de combustible en el dispositiu. Per a augmentar l'energia d'una bateria, s'han d'afegir més bateries veient-se incrementat el cost, el pes i la complexitat del sistema. Una pila de combustible mai s'esgota, mentre hi hagi combustible continua produint electricitat. Quan una bateria s'esgota ha d'experimentar un llarg i inconvenient temps de recarrega per a reemplaçar l'electricitat gastada. Depenent d'on es generi l'electricitat, la contaminació, els costos i els problemes quant a l'eficiència es transfereixen des de l'emplaçament de les bateries a la planta generadora central.

#### 4.1.2. Inconvenients

- ❑ La producció de l'hidrogen resulta molt costosa al no ser aquest una font primària. L'obtenció de l'hidrogen pur suposa un preu elevat.
- ❑ Alt cost destinat als sistemes d'emmagatzematge i subministrament (d'hidrogen, metanol o gas natural).
- ❑ Alt pes de piles de combustible per als prototips actuals.
- ❑ Elevada despesa energètica per a liquar l'hidrogen.
- ❑ La producció d'alguns components, al no efectuar-se a gran escala, implica un cost elevat. S'estima que un cotxe amb pila de combustible costa un 30 % més que un de gasolina o dièsel amb prestacions similars .
- ❑ Es tracta d'una tecnologia emergent. Determinats problemes encara no resolts afecten al funcionament de les piles de combustible, especialment pel que fa a la seva vida útil, el que repercuteix en la seva comercialització.
- ❑ Al tractar-se d'una tecnologia en desenvolupament i contar encara amb una baixa demanda d'unitats, el seu preu no pot, avui dia, competir amb el de les tecnologies convencionals. És d'esperar que, conforme la demanda s'incrementi, els preus es vagin equiparant.
- ❑ Els elèctrodes emprats incorporen catalitzadors per afavorir el desenvolupament de les reaccions electroquímiques. El contacte d'aquestes substàncies amb les catalítiques, tals com el monòxid de sofre o altres compostos de sofre, o el monòxid de carboni provoquen la seva inactivació irreversible. Actualment s'està estudiant la substitució d'aquests catalitzadors per materials més resistents.



## 4.2. L'economia de l'hidrogen

A principis dels anys setanta sorgeix el concepte "d'economia de l'hidrogen", al voltant d'un seminari, celebrat al 1973 als Estats Units, per analitzar quins serien els nous esquemes per a la producció i distribució d'energia a l'any 2000. Entre les propostes discutides estava la producció centralitzada d'hidrogen mitjançant electricitat i la seva distribució fins als punts de consum final, substituint l'electricitat. La baixa viscositat de l'hidrogen el feia tecnològicament possible i econòmicament viable en funció dels costos de producció. En aquell moment, els avanços aconseguits en materials i en electroquímica mostraven la viabilitat d'utilitzar piles de combustible amb hidrogen per a generar electricitat, ja que poden tenir diversos grandàries i potències i funcionar amb diferents combustibles sense emetre diòxids de carboni ni emissions contaminants. La primera conferència internacional sobre aquest tema es va celebrar al març del 1974.

Es tracta per tant, d'un escenari energètic futur en el que l'hidrogen s'utilitzarà per substituir als combustibles fòssils, la qual cosa requerirà comptar amb la capacitat per produir-lo en quantitats necessàries, disposar d'infraestructures per realitzar el transport fins als punts de consum i desenvolupar tecnologies d'ús final necessàries. L'objectiu principal és reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle i altres contaminants, associades a les fonts primàries actuals, a més de contribuir a una millor utilització dels recursos naturals disponibles localment, diversificant les fonts i reduint la dependència exterior.

El Japó va ser el primer país en establir un pla nacional per a l'utilització de l'hidrogen i les piles de combustibles com a base d'un nou sistema energètic. Al gener del 2003, es va llençar la "hydrogen fuel initiative", amb un pressupost de 1200 milions de dòlars per part del govern dels Estats Units. L'objectiu d'aquesta iniciativa és accelerar el desenvolupament de tecnologies amb possibilitats de produir, transportar, emmagatzemar i utilitzar l'hidrogen paral·lelament al desenvolupament de les piles de combustible per a vehicles, de manera que al 2030 l'hidrogen pugui ser competitiu al sector del transport. Aquesta ha sigut la senyal de partida per a que molts països hagin iniciat "fulles de ruta", per dibuixar els possibles camins i alternatives existents per aconseguir que l'hidrogen sigui un substitut per als combustibles fòssils i pugui contribuir a la solució del canvi climàtic.

La Plataforma Tecnològica Europea de l'Hidrogen i les Piles de Combustible, creada per la Comissió Europea, té per propòsit facilitar el desenvolupament i accés als mercats de sistemes energètics i de tecnologies basades en hidrogen i piles de combustible per aplicacions al transport, sistemes estacionaris i aplicacions portàtils, econòmicament competitives amb les solucions actuals.

A nivell estatal, existeix la Plataforma Tecnològica Espanyola de l'Hidrogen i les Piles de Combustible, l'objectiu de la qual és facilitar i accelerar la utilització i desenvolupament a Espanya de sistemes basats en hidrogen i piles de combustible, i a les seves tecnologies, per a l'aplicació als sectors de transport, estacionaris i portàtils.

Malgrat tot, existeixen nombrosos problemes científics i tecnològics a resoldre abans que l'hidrogen pugui considerar-se un combustible alternatiu als actuals i ser la solució al problema energètic. És necessari prèviament, com succeeix amb tota tecnologia innovadora, resoldre un seguit d'obstacles



científics i tecnològics per demostrar la competitivitat i viabilitat de l'hidrogen respecte a les tecnologies actuals. Aquestes requereixen millores en quant a costos i fiabilitat d'operació, el qual, a la vegada, demanda resoldre problemes de ciència bàsica i desenvolupar solucions innovadores en l'ús final.

En primer lloc, no cal oblidar que l'hidrogen no és una font d'energia sinó un vector que la transporta des d'on es produeix fins als seus usos finals, com la electricitat. Es necessita energia per produir-lo, pel qual mai podrà ser més econòmic que l'energia consumida al procés, ni es podrà obtenir més energia que la utilitzada per a la producció. Tampoc serà "net" si la font primària d'energia utilitzada no ho és, i als anàlisi de viabilitat s'haurà de considerar junt amb l'eficiència i cost de l'energia consumida a la seva producció, els costos associats a la decisió d'optar entre sistemes de producció distribuïts o centralitzats.

Aconseguir que l'hidrogen sigui una alternativa energètica per a ser utilitzat en múltiples sectors econòmics, requereix produir-lo en quantitats necessàries de manera eficient, segura i mediambientalment acceptable a preus competitius amb altres opcions. Es necessari desenvolupar tecnologies per al seu ús final en distintes aplicacions i dissenyar i construir infraestructures segures i eficients que facilitin la seva utilització als usuaris.

Es requereix realitzar un important esforç en recerca i desenvolupament, incloent desenvolupaments en ciència bàsica, per tal de poder impulsar tecnologies emergents basades en el coneixement científic disponible que possibilitin reduir els actuals costos de les tecnologies de producció i emmagatzematge, juntament amb avanços en nous materials per millorar el rendiment i la duració de les piles de combustible.

Amb el present projecte s'ha intentat contribuir en l'àmbit del desenvolupament de l'hidrogen com a vector energètic. L'energia renovable, sigui biomassa, eòlica, solar, geotèrmica i en particular hidràulica, està destinada a produir electricitat i alimentar la xarxa elèctrica. No obstant, alguns casos, quan la demanda d'energia està allunyada de la xarxa, interessa produir localment hidrogen mitjançant electrolitzadors, i a través d'energies renovables, per tal de poder realitzar un abastiment elèctric raonable. A partir d'energies renovables, s'ha optat per dissenyar una instal·lació elèctrica, tot combinant energia eòlica i energia solar fotovoltaica, en el cas que es presenta a continuació, i utilitzant l'hidrogen com a vector energètic.



## 5. ESTAT DE L'ENERGIA EÒLICA A CATALUNYA

### 5.1. Situació actual

Les primeres iniciatives de construcció de parcs eòlics a Catalunya es van produir l'any 1984, amb la construcció del parc eòlic de *Garriguella* (el primer parc eòlic connectat a xarxa de l'estat espanyol), que tenia cinc aerogeneradors de 24 kW cadascun. Una vegada cobertes les expectatives de demostració de la tecnologia d'aquest parc, es va desmantellar l'any 1988. L'any 1991 va entrar en funcionament el parc eòlic de *Roses*, dissenyat també com a banc de proves d'aquesta forma renovable d'energia. Aquest parc té una potència de 590 kW, amb sis aerogeneradors, quatre de 110 kW i dos de 75 kW. En la mateixa línia, l'any 1994, tot just a les portes de l'eclosió eòlica, a Tortosa es va construir el Parc Eòlic del *Baix Ebre*, gràcies a l'impuls de les Administracions Públiques (hi van participar tant les administracions locals com la Generalitat de Catalunya), i a l'esforç del propi fabricant dels aerogeneradors, però sobretot per la subvenció aconseguida a la inversió que va fer econòmicament viable el projecte. Aquest parc té una potència global de 4.050 kW, construït amb 27 generadors de 150 kW de potència unitària.

No és fins la segona meitat dels anys noranta que l'energia eòlica assoleix la majoria d'edat amb l'aparició dels aerogeneradors de 600 kW i el manteniment d'una remuneració suficient per a l'electricitat generada, que converteix en econòmicament viable bona part dels projectes potencials tant a Catalunya com a Espanya.

L'any 1999 es va produir un gran salt pel que fa a la potència eòlica instal·lada, amb l'entrada en funcionament del parc eòlic del *Trucafort* situat en els municipis de Pradell de la Teixeta, l'Argentera, la Torre de Fontaubella i Colldejou, que té una potència total de 29,85 MW amb 66 aerogeneradors de 225 kW i 25 de 600 kW. Els anys 1999 i 2000 es va posar en funcionament la primera i la segona fase del parc eòlic *Colladetes*, en el municipi del Perelló, amb una potència total de 36,63 MW que li proporcionen 54 aerogeneradors. Posteriorment, l'any 2001 va entrar en servei un nou parc eòlic en el municipi del Perelló. És el parc anomenat de les *Calobres*, que amb 17 aerogeneradors de 750 kW té una potència total de 12,75 MW i va fer augmentar la potència instal·lada a Catalunya fins als 83,9 MW. L'any 2002 va entrar en servei el parc eòlic *Mas de la Potra* als municipis de Pradell de la Teixeta i Duesaigües, amb dos aerogeneradors de 1.300 kW amb una potència total de 2,3 MW. Finalment, l'any 2004 van entrar en funcionament 7,92 MW, corresponents als 6 aerogeneradors de 1.320 kW del parc eòlic *Collet dels Feixos*, al municipi de Duesaigües. D'aquesta manera, la potència eòlica instal·lada a Catalunya a l'any 2004 es va situar als 94,4 MW.

La producció d'electricitat dels parcs eòlics en funcionament a Catalunya ha anat augmentant des dels 720 MWh anuals a principis dels anys noranta, produïts bàsicament pel Parc Eòlic de Roses, fins als 163 GWh (14 ktep) de l'any 2003, amb els parcs abans esmentats en funcionament (cal tenir en compte que el 2003 no va ser un any amb bon recurs eòlic). Tot i l'augment de la potència instal·lada en els anys noranta, la producció eòlica només representa el 0,36% de la producció bruta d'electricitat a Catalunya de l'any 2003 i un 1,7% del total del consum d'energies renovables.



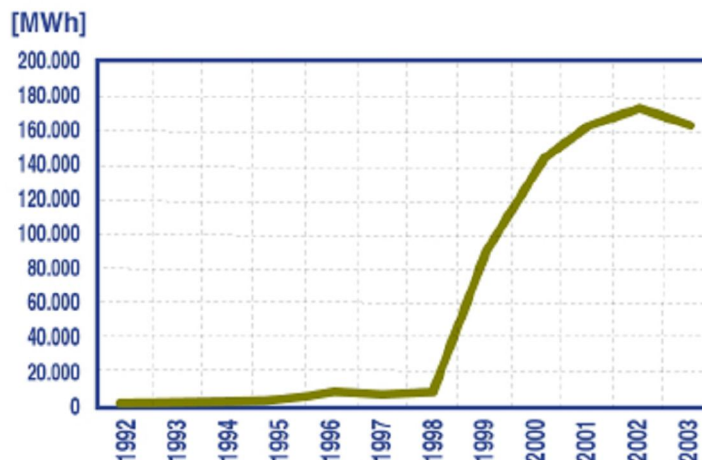


Fig. 5.1.1. Evolució de la producció d'electricitat en els parcs eòlics en funcionament de Catalunya (Font: Pla de l'energia de Catalunya 2006-2015)

## 5.2. Generació d'energia eòlica

El 1988 es va elaborar l'Atlas eòlic de Catalunya, basat en dades enregistrades a 115 estacions i en dades d'enquestes a 546 entitats de Catalunya. La principal conclusió extreta d'aquest mapa eòlic era l'existència de dues zones clarament ventoses al Nord-Est i al Sud de Catalunya, tot i que altres zones aïllades presentaven potencialitats interessants que feia pensar en la possibilitat que també hi haguessin zones de vents alts.

L'any 2004, el Servei Meteorològic de Catalunya, per iniciativa conjunta del Departament de Medi Ambient i de l'Institut Català d'Energia, va elaborar un nou Mapa de recursos eòlics. En aquest cas, el mapa no s'ha realitzat a partir de les dades enregistrades a estacions de superfície, sinó a partir de models meteorològics que simulen l'estat de l'atmosfera tridimensionalment. El mapa proporciona informació del vector vent a tot el territori a alçades de 30, 60 i 80 metres i amb una resolució espacial de 200 metres.

Una primera anàlisi de la velocitat del vent mitjana anual a 60 i 80 metres d'alçada permet diferenciar quatre zones a Catalunya amb un potencial eòlic significatiu:

- ❑ El nord-est de Catalunya (zona de l'Alt i el Baix Empordà)
- ❑ Pràcticament tot el litoral sud (des del sud del Tarragonès fins el Delta de l'Ebre)
- ❑ Una àmplia zona del prelitoral sud (part de la Ribera d'Ebre, del Priorat, de la Terra Alta, del Baix Ebre i del Montsià)



- El sud-oest de la depressió central (part del Segrià, de les Garrigues, de l'Urgell, de la Segarra, de la Conca de Barberà i de l'Anoia)

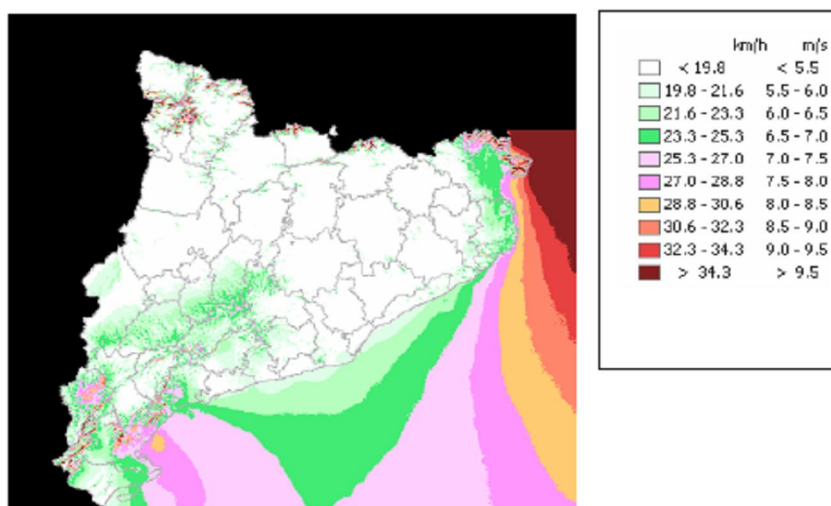


Fig. 5.2.1 Mapa de recursos eòlics. Velocitat mitjana del vent a 80 m d'alçada (Font: Servei Meteorològic de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge)

### 5.3. Perspectives de futur

Actualment es contempen diferents escenaris, l'escenari BASE i l'escenari IER. L'escenari BASE es caracteritza pel següent: contempla un escenari on no s'apliquen les mesures proposades i que el sostre eòlic de Catalunya es situa entre 1000-1500 MW.

|                                  | Any 2003 | Any 2010 | Any 2015 |
|----------------------------------|----------|----------|----------|
| <b>Potència instal·lada (MW)</b> | 87       | 1.035    | 1.313    |
| <b>Energia generada (GWh)</b>    | 163      | 2.567    | 3.290    |

Taula 5.3.1. Evolució de la potència eòlica instal·lada (MW) a l'escenari BASE (Font: Pla de l'energia de Catalunya 2006-2015)

L'escenari IER, aplica les mesures proposades a l'Annex H. El potencial s'ha avaluat tenint en compte els projectes viables actualment autoritzats i en tràmit i el potencial eòlic existent.

El sostre eòlic de Catalunya, tenint en compte el potencial existent i les zones incompatibles amb l'energia eòlica per qüestions ambientals i de protecció del patrimoni cultural, s'ha establert al voltant dels 3.500 MW. S'ha estimat que s'assolirà aquesta potència a l'any 2015.





|                           | Any 2003 | Any 2010 | Any 2015 |
|---------------------------|----------|----------|----------|
| Potència instal·lada (MW) | 87       | 3.000    | 3.300    |
| Energia generada (GWh)    | 163      | 7.466    | 8.813    |

Taula 5.3.2. Evolució de la potència eòlica instal·lada (MW) a l'escenari IER (Font: Pla de l'energia de Catalunya 2006-2015)

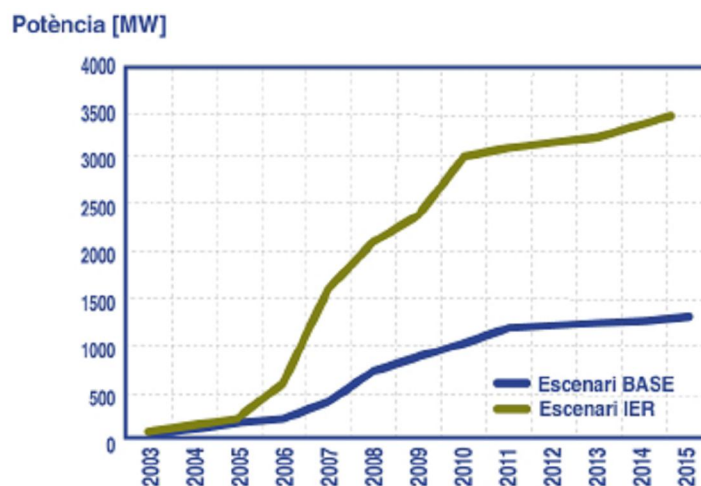


Fig. 5.3.1 Evolució de la potència instal·lada als dos escenaris (Font: Pla de l'energia de Catalunya 2006-2015)

Les inversions necessàries per a assolir l'objectiu de disposar d'un parc de generació eòlica de 3.500 MW en l'horitzó de l'any 2015, són de 3.235 milions d'euros. Aquests valors no tenen en compte les inversions necessàries per a la construcció de les infraestructures elèctriques que permetin l'evacuació de la producció dels parcs eòlics, que ja s'han comptat en l'apartat referit a les infraestructures energètiques.



## 6. SITUACIÓ DE L'ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA A CATALUNYA

### 6.1. Situació actual

L'energia solar representa un important recurs energètic a Catalunya. La radiació solar disponible a Catalunya és una de les més elevades d'Europa, amb mitjanes anuals d'irradiació diària al voltant dels 14,5 MJ/m<sup>2</sup>.

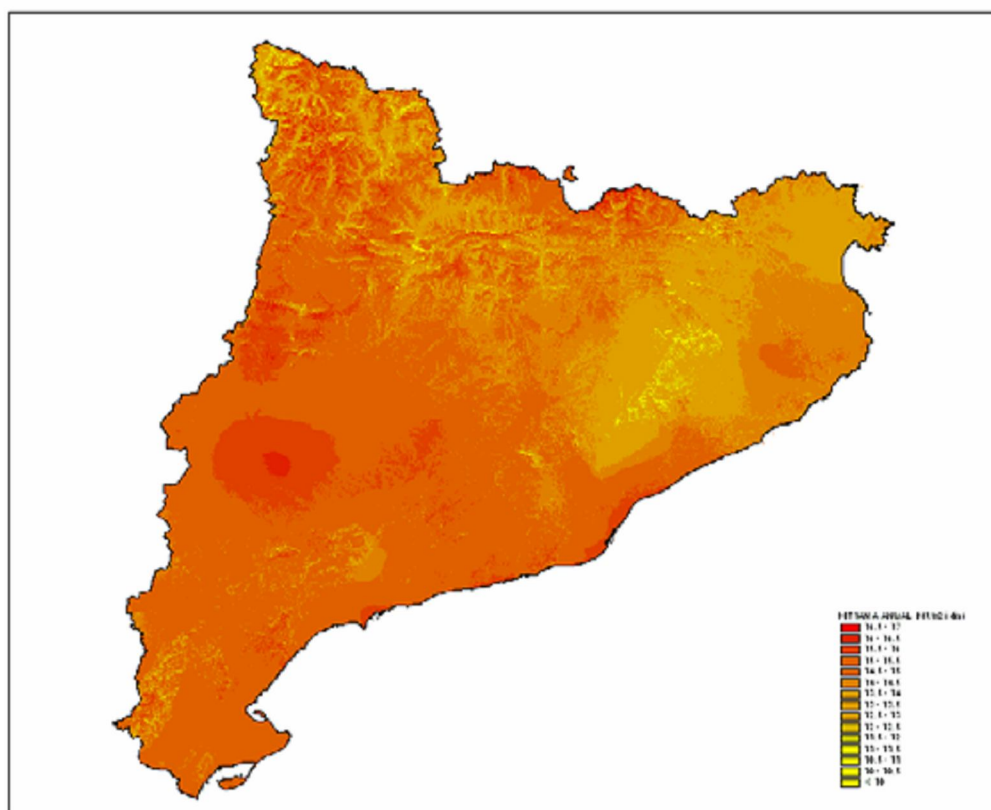


Fig. 6.1.1 Mapa d'irradiació global diària, mitjana anual (MJ/m<sup>2</sup>). (Font: Servei Meteorològic de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge)

Malgrat l'alt nivell de radiació incident a Catalunya, aquesta font d'energia neta i renovable es troba encara en un estat de subaprofitament. L'activitat del mercat de l'energia solar a Catalunya és encara poc significativa i es situa molt per sota d'altres països del centre i nord del continent europeu tot i que en els darrers anys hi ha hagut un enlairament molt prometedori d'aquestes tecnologies.

S'estima que, a finals de l'any 2004, a Catalunya hi ha una superfície instal·lada en servei de 62.000 m<sup>2</sup> de captadors tèrmics i una potència total de les instal·lacions fotovoltaïques de 3.539 kWp, dels



quals 2.469 kWp són instal·lacions connectades a la xarxa elèctrica i 1.070 kWp són aplicacions aïllades.

Darrerament s'ha experimentat un gran creixement de l'energia solar tèrmica, en gran part gràcies al fenomen d'alta replicabilitat de les ordenances solars. Actualment s'instal·len al voltant de 25.000m<sup>2</sup> anuals a Catalunya.

Des de l'any 1999 en que van ser aprovades les dues primeres ordenances a Barcelona i Sant Joan Despí, molts altres municipis han seguit el seu exemple. A finals de 2004, es va arribar a 29 ordenances en vigor a Catalunya que cobren més d'un 50% de la població catalana. Aquest exemple ha estat seguit també per altres ciutats com Madrid o Sevilla i ha despertat molt interès arreu del món on ja hi han exemples semblants a Itàlia i Austràlia.

Aquest gran ressò va fer sorgir noves iniciatives més ambicioses com el Código Técnico de la Edificación, que obliga als edificis de nova construcció que tinguin una demanda d'aigua calenta sanitària i depenent de la zona climàtica on es troben, que incorporin una instal·lació solar tèrmica per cobrir part de les seves necessitats.

Pel que fa a les instal·lacions solars fotovoltaïques, en la seva evolució es poden distingir dues etapes ben diferenciades. Una primera, des de mitjans dels anys 70 fins l'any 2000, on fonamentalment s'han anat realitzant instal·lacions aïllades de la xarxa elèctrica en l'àmbit de l'electrificació rural, de manera continuada però més significativa en la dècada dels noranta, gràcies als programes institucionals d'electrificació rural i de demostració d'aquesta tecnologia.

Posteriorment, a partir de l'any 2000, es produeix un salt significatiu en la potència instal·lada anualment, en entrar en funcionament de forma significativa instal·lacions connectades a la xarxa elèctrica, degut al desenvolupament d'una normativa favorable tant pel que fa a la connexió d'aquests sistemes a la xarxa elèctrica com per les primes econòmiques que poden cobrar els usuaris per la seva producció.

S'esperen fortes perspectives de creixement de l'energia solar fotovoltaica arran de les nombroses iniciatives de construcció de granges solars, que dins del marc legislatiu actual es troben en un moment favorable de desenvolupament.

El Código Técnico de la Edificación, preveu també l'obligatorietat d'incorporació d'instal·lacions solars fotovoltaïques als edificis de nova construcció dins de l'àmbit del sector terciari. En aquest cas, la grandària de la instal·lació dependrà també de la zona climàtica on s'ubiqui l'edifici i la superfície construïda del mateix.

La situació actual del mercat es caracteritza per un augment de l'activitat, tant pel que fa al nombre d'instal·lacions realitzades com al nombre d'empreses del sector. Les estimacions realitzades situen les vendes en uns 25.000 m<sup>2</sup> per any de captadors solars tèrmics i uns 2.000 kWp per any de potència fotovoltaica.



Els estudis realitzats estimen el potencial màxim d'aprofitament de l'energia solar a Catalunya en 2,5 milions de m<sup>2</sup> de captadors solars tèrmics i en 450 MWp de potència fotovoltaica, sense considerar cap restricció a les primes econòmiques als usuaris d'aquestes darreres instal·lacions.

Aquestes xifres s'han valorat a partir de les anàlisi realitzades per a cada tecnologia: solar tèrmica, solar fotovoltaica connectada a la xarxa elèctrica i solar fotovoltaica autònoma.

## 6.2. Generació d'energia solar fotovoltaica

Actualment el desenvolupament de l'energia fotovoltaica a Espanya continua sent baix respecte a països com Alemanya o Japó. Tot i això, és el tercer país de la U.E. amb major potència instal·lada, amb més de 35 MWp. Des del 2003 fins al 2004 es va produir un increment del 37% en la potència total instal·lada degut a l'aprovació del RD 436/2000.

En l'aspecte econòmic, es pot dir que, abans d'aquest decret, els titulars d'una instal·lació fotovoltaica a Espanya no tenien una seguretat jurídica de que rebrien una prima per kWh fotovoltaic injectat a la xarxa. En aquell moment, el mercat necessitava importants subvencions que disminuïssin aquella inquietud, subvencions que no limitessin el mercat als pocs MW a l'any per als que hi havia ajuda.

El RD 436/2004 ha donat, a la majoria dels inversors, la seguretat que la inversió tindrà una raonable rendibilitat, la qual cosa ha propiciat, a l'any 2005, juntament amb un interès generalitzat per aquesta tecnologia, per la seva adequació mediambiental, senzillesa i fiabilitat, un augment del número de projectes i de la grandària mitjana de les instal·lacions, amb una mitja superior a 3 kW des de fa només dos o tres anys.

Les instal·lacions realitzades en l'any 2004 s'estima que van ser lleugerament superiors a 10 MW. En el futur aquest volum es superarà amb diferència, si es té en compte l'alt nombre de projectes que s'estan iniciant i els nombrosos punts de connexió a la xarxa de distribució que s'estan demanant.

Aquest nou context de major dinamisme i major volum, ha aconseguit que els preus baixin i que la seva baixada hagi compensat la pujada del preu d'algun dels components del sistema, com és el cas dels mòduls fotovoltaics.

La baixada anual de preus en l'últim any a Espanya, s'estima que ha estat del ordre d'un 5%, que és el que, tradicionalment, s'ha anat aconseguint, amb el que la indústria espanyola, en el seu conjunt, ha pogut mantenir el compromís tàcit de baixar anualment els preus.

L'únic element que ha frenat el creixement de la potència instal·lada ha estat en la dificultat que ha tingut la indústria per tal de produir panells. El silici, és l'element, després de l'oxigen, que més abunda en el nostre planeta, però no es troba ni aïllat, ni pur, sinó combinat amb l'oxigen, el procés de purificació és llarg i laboriós, com a conseqüència el mercat no s'ha pogut adaptar a la demanda.



### 6.3. Perspectives de futur

Les previsions de creixement segons els resultats de l'escenari BASE per a l'energia solar tèrmica són d'arribar als 400.000 m<sup>2</sup> i 26,4 MWp d'energia solar fotovoltaica instal·lats a l'any 2015. En l'escenari IER es preveu que l'energia solar tèrmica arribi als 1250.000 m<sup>2</sup> i l'energia solar fotovoltaica als 100 MWp instal·lats.

Suposant un manteniment del nivell de primes actual, s'espera un fort creixement dels parcs solars de forma que es preveu situar la potència instal·lada d'aquests sistemes fins a 47.000 kWp l'any 2015.

La segona contribució més important és la del sector terciari amb 25.000 kWp nous instal·lats previstos per l'any 2015. Aquest sector es veurà obligat pel Código Técnico de la Edificación i pel futur decret d'ecoeficiència a instal·lar energia solar fotovoltaica als edificis de nova construcció, on la grandària de la instal·lació variarà segons el tipus d'ús de l'edifici, la zona climàtica on s'ubica i els metres quadrats de construcció de l'edifici.

El segueix molt de prop el sector domèstic on, si bé no es veu obligat per cap ordenança ni pel Código Técnico de la Edificación, si s'estima l'increment de 13.000 MWp per l'any 2015, gràcies a la creixent implicació de la societat i a la compensació econòmica amb primes per la venda d'electricitat fotovoltaica.

Tanmateix, els estrictes criteris econòmics del sector industrial fan preveure una feble penetració, de forma que l'any 2015 s'assoleixi una potència al voltant dels 10.000 kWp. D'altra banda es preveu la consolidació dels sistemes fotovoltaics autònoms per a assegurar un servei energètic de qualitat a petits nuclis de població i habitatges aïllats distants de la xarxa elèctrica, tot contribuint al reequilibri territorial de Catalunya. Mitjançant aquestes instal·lacions fotovoltaiques s'espera proveir al voltant de 1.300 usuaris amb una potència total de 5 MWp.

L'objectiu de les aplicacions fotovoltaiques autònomes coincideix amb el potencial identificat, ja que es pressuposa que en el període fins l'any 2015 es cobriria la demanda d'electrificació detectada que no es pot cobrir mitjançant les actuacions previstes en electrificació rural convencional mitjançant línies elèctriques (Pla d'electrificació rural de Catalunya).

Les següents dues figures mostren l'evolució prevista de la potència instal·lada de l'energia solar fotovoltaica, connectada a xarxa i aïllada pels escenaris BASE i IER respectivament.



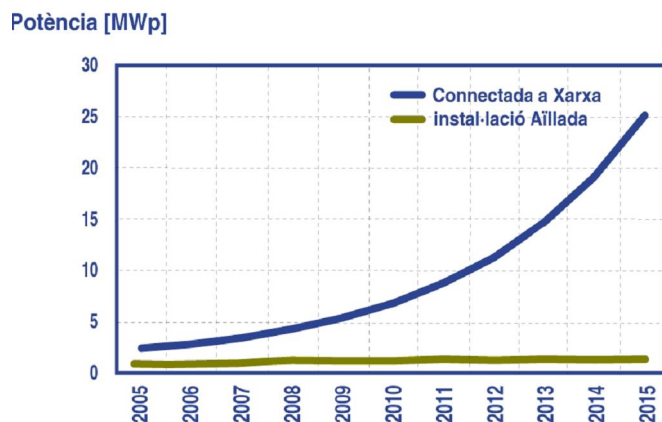


Fig. 6.3.1 Evolució de l'energia solar fotovoltaica segons l'escenari BASE (Font: Pla de l'energia de Catalunya 2006-2015)

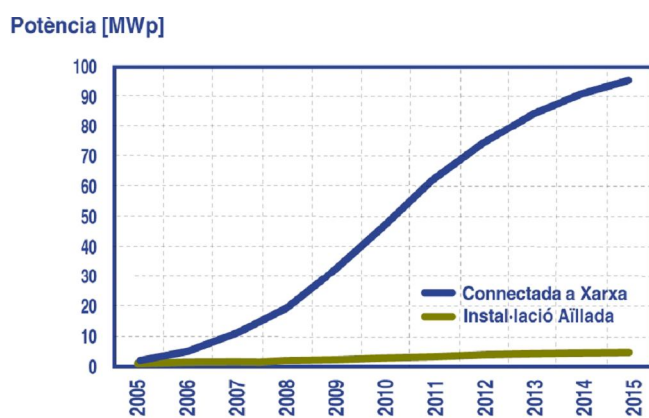


Fig. 6.3.2 Evolució de l'energia solar fotovoltaica segons l'escenari IER (Font: Pla de l'energia de Catalunya 2006-2015)



## 7. DISSENY DE LA INSTAL·LACIÓ

L'objectiu del present projecte es satisfer les necessitats energètiques de dues vivendes unifamiliars, situades una a la comarca del Berguedà i l'altre a la comarca del Tarragonès. La instal·lació dissenyada utilitzarà hidrogen com a font d'energia intermèdia, obtinguda a partir d'energies renovables, com són l'energia solar i l'energia eòlica. El projecte permetrà determinar la viabilitat d'aquest tipus d'instal·lacions en funció del dimensionat realitzat, tant per a la superfície de plaques solars i el diàmetre de l'aerogenerador.

La utilització de fonts d'energia renovables com a energia primària és conseqüent amb l'estat de desenvolupament mediambiental actual. Es vol que la vivenda sigui autosuficient i alhora respectuosa amb el medi ambient.

A l'hora de decidir l'energia renovable a utilitzar, s'ha tingut en compte la factibilitat d'utilització d'alguna d'aquestes. Per aquest motiu l'energia hidràulica i la biomassa han sigut descartades. A totes dues vivendes s'ha optat per realitzar l'estudi a partir de l'energia solar i l'energia eòlica. En el cas de la vivenda del Berguedà, l'energia que es pot obtenir del vent és molt reduïda, tot i que s'ha volgut realitzar l'estudi per tal de poder fer la comparació. En el cas de la vivenda de la comarca de Tarragona, la instal·lació d'aerogenerador permetrà optimitzar la superfície solar degut a la major energia del vent de la zona.

A la sortida dels panells fotovoltaics i de l'aerogenerador, és necessari col·locar un convertidor de tensió. Aquest tindrà dues funcions principals: regular la tensió de sortida per tal que sigui constant i modificar el valor d'aquesta. Aquesta energia elèctrica, ja podrà ser utilitzada pels diferents elements de l'habitatge. Però degut a que les energies solars i eòliques no són energies constants, caldrà preveure un sistema d'emmagatzematge dels excedents d'energia que es produeixen. És en aquest punt on apareix la figura de l'hidrogen. Aquest haurà de ser l'encarregat de emmagatzemar l'energia i proporcionar-la en el moment adequat.

El procés per a l'obtenció de l'hidrogen es farà a partir d'un electrolitzador. Els electrolitzadors funcionen a partir del fenomen de l'electròlisi. Aquest fenomen es descriu a l'annex B.

Un cop produït l'hidrogen s'ha d'emmagatzemar per tal de poder ser utilitzat en el moment més convenient. Existeixen diferents sistemes d'emmagatzematge per a l'hidrogen com es descriuen a l'annex A. Principalment, els sistemes d'emmagatzematge són en estat gasós, en estat líquid i en estat sòlid. El sistema d'emmagatzematge en elegit per a la realització d'aquest projecte, ha estat el d'hidrogen comprimit en estat gasós. Degut a la baix densitat energètica de l'hidrogen per unitat de volum, aquest s'haurà de comprimir abans fins a una pressió de 25MPa. Al dipòsit s'emmagatzemarà tot l'excedent energètic que es produirà durant les èpoques de l'any en les quals els consums energètics siguin inferiors a la producció.

A partir del dipòsit d'hidrogen, caldrà col·locar la pila de combustible. Cal comentar que de la pila de combustible, a més de transformar l'energia de l'hidrogen en electricitat, també se n'obté energia tèrmica, que podrà ser utilitzada per a l'aigua calenta d'ús sanitari (ACS).



La corrent continua que s'obté de la pila de combustible ha de ser transformada en alterna de 220 volts mitjançant un inversor, ja que és aquesta la tensió i forma d'ona amb la que treballen els electrodomèstics.

Finalment, per tal de controlar la instal·lació, caldrà disposar d'un sistema de gestió que haurà d'estar format per sensors de pressions i actuadors, per tal de mantenir un funcionament correcte del sistema.

Per tant els elements necessaris en les instal·lacions que es plantegen són els següents:

| Elements                          |
|-----------------------------------|
| Aerogenerador                     |
| Plaques fotovoltaïques            |
| Convertidor de tensió (DC/DC)     |
| Electrolitzador                   |
| Compressor                        |
| Dipòsit d'hidrogen a alta pressió |
| Pila de combustible               |
| Inversor (DC/AC)                  |
| Unitat de Gestió                  |
| Sensors de pressió                |
| Electrovàlvules                   |
| Reguladors de pressió             |
| Filtre d'oli                      |
| Detector d'hidrogen               |

Taula 7.1 Elements de la instal·lació

Aquests elements seran descrits en els posteriors apartats.

## 7.1. Plaques solars

Els sistemes fotovoltaïcs aprofiten la radiació solar, font inexhaurible, local, no contaminant i silenciosa, per a la producció d'electricitat. Es tracta de la tecnologia d'aprofitament de l'energia solar desenvolupada més recentment i té un camp d'aplicació molt ampli.

Els avantatges de la tecnologia fotovoltaïca són evidents: utilització de recursos naturals, autòctons, abundants i gratuïts, tecnologia a l'abast, autonomia de subministrament amb un mínim de manteniment, baix impacte ambiental, absència de línies elèctriques, el seu cost no està sotmès a





l'augment dels preus energètics, etc. L'electrificació amb sistemes fotovoltaics es conforma com una alternativa vàlida a les fonts de subministrament convencional.

A grans trets podem dir que l'efecte fotovoltaic és la capacitat que tenen per absorbir fotons (nom que reben les partícules de la llum del sol) i tot seguit alliberar un corrent d'electrons, que si es captura pot ser usat com a electricitat.

La clau en el desenvolupament de la conversió fotovoltaica han estat els elements semiconductors. El silici, el germani, l'arseniür de gal·li, el sulfur de cadmi i alguns altres elements tenen la característica de ser portadors de dos tipus de corrent elèctric: un amb electrons lliures, capaços de viatjar pel vidre i un altra anomenat buit, dotat de càrrega positiva. Així hi ha semiconductors en els quals predomina la conducció per buits, anomenats tipus *p* i en altres predomina la conducció d'electrons lliures que s'anomenen tipus *n*. Però, la característica més important dels semiconductors és que la resistivitat elèctrica es pot disminuir afegint-hi impureses. Aquestes impureses que afecten a les propietats elèctriques del semiconductor s'anomenen dopants. Els dopants són elements similars en estructura i valència química que s'inclouen dins de la matriu per fer que hi hagi un electró de més o de menys que en el semiconductor. Els dopants són els elements capaços de poder captar, controlar i guiar aquest feix d'electrons en la matriu semiconductora.

El silici és el semiconductor més emprat en la tecnologia fotovoltaica. Afegint-li impureses de fòsfor o arsènic el silici esdevé de tipus *n*. Les impureses de bor o gal·li el fan de tipus *p*. En altres paraules, primer cal obtenir el silici amb una gran puresa i després dopar-lo amb impureses en concentracions infinitesimals (de  $10^{16}$  a  $10^{19}$  d'àtoms d'impuresa per  $\text{cm}^3$ ). Aquesta és una de les raons que fa que les cèl·lules fotovoltaïques siguin cares i requereixin una tecnologia d'avantguarda.

El fet que explica el comportament dels semiconductors té a veure amb la distribució dels àtoms en l'estructura cristal·lina. Recordem que un àtom de silici és com un tetràedre. Així, quan s'introdueix un àtom de dopant de tipus *p* com el fòsfor el resultat és un electró lliure que pot viatjar pel cristall de silici. En canvi, en els semiconductors de tipus *n* com el silici dopat amb bor comporta una càrrega de signe positiu. Quan un semiconductor s'il·lumina es trenquen enllaços químics que provoquen una generació d'electricitat, variable segons la temperatura ambient, que reconduirà el moviment d'electrons en la direcció i sentit de l'anomenada unió *p-n*. En altres paraules, els fotons de la llum produeixen una tensió elèctrica semblant a la que es produeix en els borns d'una pila seca. Mitjançant contactes metàl·lics en cada una de les cares es pot capturar l'energia elèctrica i emprar-la en diferents aplicacions.

Els principals elements d'un sistema fotovoltaic són els panells fotovoltaics; aquests són els encarregats de transformar l'energia solar en energia elèctrica. Un captador solar el formen varies cèl·lules iguals connectades entre sí en sèrie i en paral·lel per tal de subministrar la tensió desitjada. La matèria prima per a la fabricació de cèl·lules fotovoltaïques és el silici, aquest es presenta de tres formes diferents:

- Silici monocristal·lí: En aquest cas el silici que compona les cèl·lules dels mòduls és un únic cristall. La xarxa cristal·lina és la mateixa a tot el material i té moltes poques imperfeccions. El procés de cristallització és complicat i costós, però tanmateix, és el que proporciona la major eficiència de conversió de la llum en energia elèctrica.



- ❑ Silici policristal·lí: El procés de cristal·lització no és tan laboriós i la xarxa cristal·lina no és la mateixa en tot el material. Aquest procés és més econòmic que l'anterior però s'obtenen rendiments lleugerament inferiors.
- ❑ Silici amorf: El silici amorf no conté una xarxa cristal·lina i s'obté un rendiment força inferior al rendiment del silici cristal·lí. Tot i això, a més de ser més econòmic que la resta, té l'avantatge de ser un material molt absorbent per la qual cosa amb una fina capa és suficient per captar la llum solar.

Per tal de millorar el rendiment de les plaques fotovoltaïques existeixen uns concentradors solars. Amb aquests concentradors els panells de silici policristal·lí poden arribar al 30% de rendiment. Els concentradors de llum estan formats per lents de plàstic, per tant tenen un cost reduït en comparació amb les cèl·lules fotovoltaïques.

Les lents Fresnel concentren la llum solar directament en un punt focal de 2mm de diàmetre. La concentració multiplicada per 500 permet reduir la superfície activa de la cèl·lula fotovoltaïca a una fracció de la del mòdul convencional. D'una banda, aquest sistema ofereix un important potencial d'estalvi de costos per la reducció del material utilitzat, i d'altra banda permet la utilització de cèl·lules solars d'alta qualitat i de cost elevat, que sota la concentració i per els efectes termodinàmics aconseguixen rendiments molt elevats. S'opta per l'elecció d'aquestes plaques amb concentradors solars de l'empresa Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme, amb rendiments superiors al 30%.

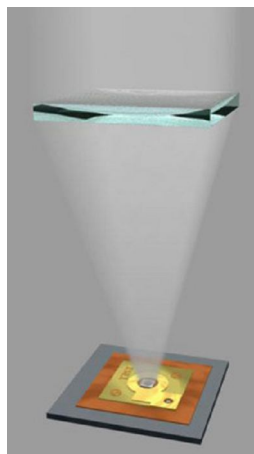


Fig. 7.1.1. Concentrador Solar. (Font: Concentrix Solar (Tecnologia Flatcon))

## 7.2. Aerogenerador

L'aprofitament de l'energia eòlica per a la generació d'electricitat mitjançant aerogeneradors, és una tecnologia que va experimentar un desenvolupament tècnic i comercial important a finals dels anys 70,



després de la primera crisi del petroli. En general, i independentment de la seva aplicació, les màquines eòliques poden ser dividides en dos grans grups: les d'eix horitzontal i les d'eix vertical.

Els aerogeneradors d'eix vertical no necessiten mecanisme d'orientació i el generador elèctric pot anar al terra. Però la seva producció energètica és menor, respecte un aerogenerador convencional de la mateixa potència i s'han de motoritzar per tal de facilitar la seva posada en marxa. El tipus més desenvolupat és el Darreius, degut a les característiques aerodinàmiques de les pales, que permeten aprofitar el vent dintre d'un ampli ventall de velocitats.

Els d'eix horitzontal són els més emprats i permeten cobrir des d'aplicacions aïllades de petita potència (d'aproximadament 1 kW) fins a instal·lacions en grans parcs eòlics, on es pot arribar a utilitzar aerogeneradors per sobre de 1 MW de potència.

Un aerogenerador d'eix horitzontal és, bàsicament, una màquina rotacional, el moviment de la qual és produït per l'energia cinètica del vent, quan aquest actua sobre un rotor que normalment disposa de tres pales. El moviment rotacional produït és transmès i multiplicat mitjançant un multiplicador de velocitat, fins un generador que produeix l'energia elèctrica. Tots aquest components s'instal·len sobre una gòndola que se situa dalt d'una torre de suport.

Cada aerogenerador disposa d'un microprocessador que controla i regula les seves variables de posada en marxa, funcionament i aturada, transmetent tota aquesta informació a la central de control de la instal·lació. Igualment, cada aerogenerador incorpora, en la base de la torre, un armari amb tots els components elèctrics (interruptors automàtics, transformadors d'intensitat, protectors de sobre tensió, etc.), previs al transport de l'energia elèctrica generada fins la connexió amb la xarxa o els punts de consum.

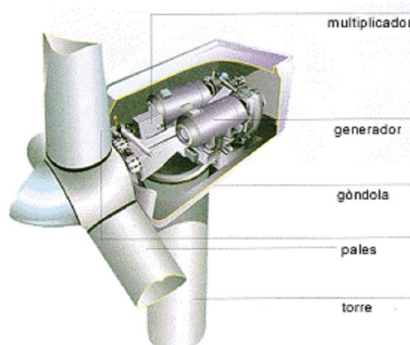


Fig. 7.2.1. Secció d'un aerogenerador. (Font: [www.windpower.org](http://www.windpower.org))

L'energia obtinguda per un aerogenerador determinat depèn bàsicament de la potència del vent travessant el rotor i és directament proporcional a la densitat de l'aire, la superfície escombrada per les seves pales i la velocitat del vent. El coeficient de potència indica amb quina eficiència treballarà l'aerogenerador, ja que, en funció de la velocitat del vent, la velocitat serà més gran o més petita. Al disseny realitzat, l'eficiència de l'aerogenerador per a la vivenda del Berguedà és del 10% (degut a que la velocitat promig del vent a la zona és de 2,5 m/s), mentre que l'eficiència de l'aerogenerador de la



vivenda de Tarragona és del 30% (amb una velocitat promig de 6m/s). Al següent gràfic es pot observar aquest fenomen amb més claredat:

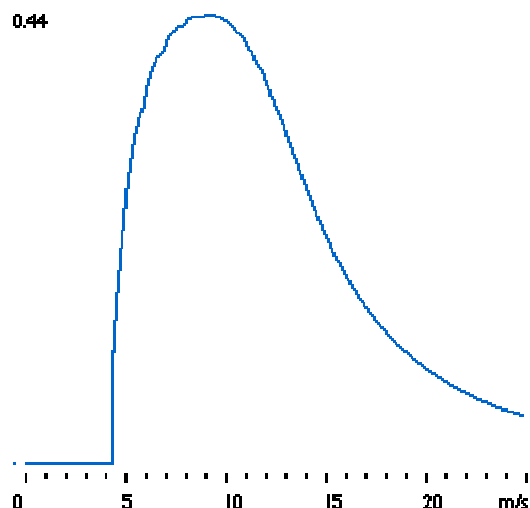


Fig. 7.2.2. Eficiència d'un aerogenerador front la velocitat del vent (Font: [www.windpower.org](http://www.windpower.org))

### 7.3. Convertidor de tensió

Els convertidors de tensió s'utilitzen per modelar el voltatge del corrent continu. La següent figura mostra el funcionament d'un convertidor directe (buck). En tancar l'interruptor, s'alimenta l'autoinducció en sèrie amb la càrrega i quan s'obre, l'energia emmagatzemada a la autoinducció impedeix que la intensitat s'anul·li. Si hi ha una autoinducció prou gran o la freqüència de commutació és prou elevada, la intensitat de sortida és pràcticament continua.

Una de les característiques d'aquests convertidors és el seu rendiment, el qual ha de ser el més elevat possible per tal que afecti el mínim possible al rendiment global de la instal·lació. Els convertidors destinats a les instal·lacions fotovoltaïques ofereixen un rendiment molt elevat, superior al 95%.

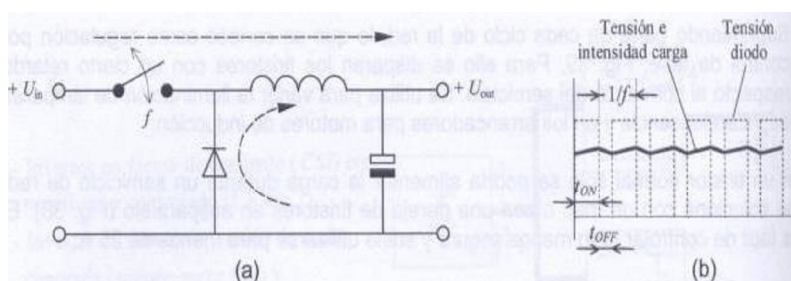


Fig. 7.3.1. Funcionament d'un convertidor directe (buck) i forma de l'ona de sortida. (Font: Tecnologia Eléctrica (ETSEIB/UPC))



## 7.4. Electrolitzador

El funcionament d'un electrolitzador consisteix en, mitjançant dos elèctrodes (ànode i càtode), fer passar un corrent elèctric a través d'aigua, amb la qual cosa aconseguim la divisió de cada dos molècules d'aigua en dues molècules d'hidrogen i una d'oxigen. L'oxigen es produeix a l'ànode i l'hidrogen al càtode. A l'annex B s'explica amb més detall el funcionament de l'electrolitzador a través del procés d'hidròlisi.

A l'estudi realitzat, s'ha optat per un electrolitzador de la marca AccaGen, concretament el model AGE-1.0. Tots els electrolitzadors de la marca AccaGen presenten una eficiència elevada. Especialment, per a les instal·lacions de producció d'hidrogen a partir d'energies renovables, fabrica electrolitzadors amb una molt elevada eficiència, superior fins i tot al 85%. A més, aquests electrolitzadors munten elèctrodes dissenyats per treballar amb fortes fluctuacions de corrent elèctrica, el que habitualment succeeix amb els sistemes de producció d'energies solars i eòliques, sense sofrir una degradació de l'elèctrode amb el temps.

## 7.5. Compressor

La funció del compressor en la instal·lació és comprimir l'hidrogen a una pressió elevada per tal de reduir el volum que ocupa l'hidrogen produït amb l'electrolitzador. La densitat energètica per unitat de volum de l'hidrogen és molt baixa, per tant és necessari comprimir a pressions molt elevades. Les pressions habituals de compressió oscil·len entre els 200-250 bar (20-25MPa). El compressor escollit per a la instal·lació és el de la marca CompAir, concretament el model HQ15.

## 7.6. Dipòsit d'alta pressió

El dipòsit d'alta pressió és necessari per tal d'emmagatzemar l'excedent d'hidrogen que es produirà durant les èpoques de l'any en les quals la producció d'energia sigui superior al consum. Degut a que la densitat de l'hidrogen és prou baixa, aquest s'ha de comprimir a elevades pressions per tal que ocupi un volum raonable.

Els dipòsits o ampolles d'emmagatzematge d'hidrogen a pressió consisteixen en un capa d'un polímer, en contacte amb el gas, que realitza la funció de contenció de l'hidrogen. Aquest polímer és reforçat amb una capa de resina epoxi o de fibra de carboni, que realitza la funció de càrrega per tal d'aplicar una pressió constant a l'hidrogen. Finalment una fulla metàl·lica prima actua com una cuirassa protegint el dipòsit dels impactes.



## 7.7. Pila de combustible

Les piles de combustible són aparells dissenyats per a la obtenció eficient i neta d'energia elèctrica a partir de reaccions electroquímiques. La clau per a la alta eficiència es troba en el fet que en una pila de combustible no hi ha combustió sinó reaccions d'oxidació i reducció. A l'annex E es comenta amb més detall les principals característiques d'una pila de combustible. Hi ha diferents tecnologies que distingeixen diversos tipus de piles de combustible, caracteritzades bàsicament pel tipus de combustible, el tipus d'electròlit, la temperatura de treball, la mida i la aplicació.

Per al disseny de la instal·lació, s'ha optat per la tecnologia PEM (*Protonic Exchange Membranes* o *Polymeric Electrolyte Membranes*). El combustible de les piles PEM és l'hidrogen. El seu electròlit és una membrana polimèrica prima permeable als protons però no conductora d'electrons al voltant de la qual es genera una certa diferència de voltatge. Per a conduir protons, el contingut d'aigua de la membrana ha de ser alt, per la qual cosa és necessari humitejar els gasos d'entrada al sistema. La temperatura del sistema també està limitada per la necessària presència d'aigua a l'electròlit: efectivament, la temperatura de treball de les piles PEM és baixa, al voltant dels 80°C. A aquesta temperatura, la presència d'un catalitzador a cada costat de la membrana és imprescindible per a facilitar les reaccions d'oxidació i reducció. Aquest catalitzador és típicament platí. Comparades amb altres tipus de piles, les piles PEM tenen una alta densitat de potència, baix pes i baix volum. Això les fa les més prometedores per a un ús generalitzat. Per a més informació sobre l'elecció de la pila de combustible consultar l'annex C.

## 7.8. Inversor

També anomenat ondulador o convertidor, es tracta d'un component imprescindible que serveix per a l'adaptació a les característiques del corrent demanat. La seva missió fonamental és, en general, transformar el corrent continu (12 V, 24 V, 48 V) que s'ha generat en corrent altern. Això és necessari no tan sols en els casos en que es vulgui subministrar electricitat a la xarxa, sinó també per a l'autoconsum, tenint en compte que la gran majoria d'aparells funcionen amb les condicions normals de subministrament, es a dir amb corrent alterna sinusoidal de 50Hz i 220 volts.

L'inversor emprat en els sistemes connectats a la xarxa és normalment de major potència i inclou controls de fase per adequar el corrent altern produït a la fase de l'energia de la xarxa. L'eficiència dels convertidors no és del 100%, donat que una part de l'energia es dissipa en forma de calor.

Els paràmetres principals dels inversors són la tensió d'entrada, que s'ha d'adaptar a la del generador, la potència màxima que pot proporcionar i la seva eficiència. És important que l'eficiència dels inversors sigui elevada, donat que evita haver d'augmentar la superfície captadora; cal assenyalar que no tots els inversors existents al mercat posseeixen aquesta qualitat. En tot cas, la determinació de l'inversor a utilitzar s'haurà de realitzar en funció de les característiques de la demanda. Existeixen al mercat molts tipus diferents, amb graus molt variables de complexitat i sofisticació.



## 7.9. Unitat de gestió

La central de gestió és la que s'encarrega del correcte funcionament de la instal·lació. Per fer-ho disposarà d'un conjunt de variables d'entrada (sensors de pressió al dipòsit i detector d'hidrogen) i un conjunt de senyals de sortida que marcaran el funcionament de les electrovàlvules, reguladors de pressió, electrolitzadors, piles de combustible i compressor.

## 7.10. Detector de pressió

Els sensors de pressió s'utilitzen per detectar la pressió a l'interior del dipòsit d'hidrogen per tal que el funcionament de la instal·lació sigui correcte. Al dipòsit a alta pressió la central de gestió evita que se segueixi produint hidrogen quan detecta una pressió superior a la normal.

## 7.11. Detector d'hidrogen

La funció d'aquest element és detectar si hi ha alguna fuga d'hidrogen en la instal·lació. Si en algun moment es produeix una fuga, el detector ha d'enviar un senyal a la central de gestió per tal que aquesta actuï de forma adequada. La central de gestió desactivarà automàticament el funcionament de la instal·lació i activarà uns ventiladors per tal d'evacuar ràpidament tot l'hidrogen que s'escapi a l'exterior de l'habitatge. A més activarà les electrovàlvules per tal d'aïllar el dipòsit d'alta pressió de la resta de la instal·lació.

## 7.12. Electrovàlvules

Les electrovàlvules són elements de seguretat que es posen en funcionament en el cas que hi hagi una fuga en algun punt de la instal·lació i s'encarreguen d'aïllar el dipòsit d'alta pressió. Per tant, amb l'ús d'aquestes electrovàlvules s'aconsegueix evitar que l'hidrogen del dipòsit s'escapi a l'exterior, amb el conseqüent problema que això significaria.



### **7.13. Regulador de pressió**

El regulador de pressió està ubicat entre el dipòsit d'hidrogen a alta pressió i les piles de combustible. El dipòsit es troba a altes pressions (25 MPa) i en canvi les piles de combustible utilitzades en aquest tipus d'instal·lació solen ser baixes (0,5-1 MPa). Per tant, és necessari un element que reguli la pressió alta, a una pressió de subministrament adequada per les piles d'hidrogen.

### **7.14. Filtres d'oli**

Cal col·locar filtres d'oli a continuació del compressor, ja que com es tracta d'un compressor de pistons tindrà petites pèrdues d'oli. Per tant, aquests filtres el que fan és impedir que aquestes petites pèrdues d'oli arribin a les piles de combustible.





## 8. DIMENSIONAT DE LA INSTAL·LACIÓ

La instal·lació s'haurà de dimensionar en funció de les necessitats energètiques que presenti la vivenda en qüestió. En el cas que ens pertoca, disposem de dues vivendes per al dimensionat: una situada a la comarca del Berguedà i l'altra a Tarragona. Les diferents condicions climatològiques de les dues zones permetran realitzar l'estudi comparatiu entre les diverses solucions energètiques.

Per tal de saber el consum mitjà d'una vivenda, s'ha decidit realitzar un estudi basant-se en els electrodomèstics utilitzats i en la calefacció a fer servir. Aquest estudi es mostra a continuació en un seguit de taules. A la primera d'elles, Taula 5.1, es mostra el consum energètic de cadascun dels electrodomèstics utilitzats:

| Electrodomèstic    | P(W) | Temps (h) | Energia (kWh/dia) |
|--------------------|------|-----------|-------------------|
| Frigorífic         | 220  | 24        | 5,3               |
| Microones          | 850  | 0,5       | 0,4               |
| Forn               | 1477 | 1         | 1,5               |
| Rentadora          | 2200 | 1         | 2,2               |
| Fluorescents (4)   | 144  | 1,5       | 0,2               |
| TV                 | 100  | 8         | 0,8               |
| Reproductor DVD    | 50   | 1         | 0,1               |
| HI-FI              | 75   | 2         | 0,2               |
| Làmpada de peu (2) | 40   | 4         | 0,2               |
| Halògena (12)      | 1200 | 1         | 1,2               |
| Incandescent (8)   | 160  | 0,5       | 0,1               |
| Ordinador          | 300  | 2         | 0,6               |
| Monitor            | 190  | 2         | 0,4               |
| Altres (20% total) | -    | -         | 2,6               |
| <b>TOTAL</b>       |      |           | <b>15,6</b>       |

Taula 8.1. Consum energètic dels electrodomèstics

A partir dels anteriors conceptes energètics es pot calcular l'energia elèctrica mensual consumida per la vivenda (sense tenir en compte encara el consum elèctric pel terme de calefacció):

| Mes    | Dies del mes | Energia mensual (kWh) |
|--------|--------------|-----------------------|
| Gener  | 31           | 484,3                 |
| Febrer | 28           | 437,4                 |
| Març   | 31           | 484,3                 |
| Abril  | 30           | 468,6                 |
| Maig   | 31           | 484,3                 |
| Juny   | 30           | 468,6                 |
| Juliol | 31           | 484,3                 |
| Agost  | 31           | 484,3                 |



|          |    |       |
|----------|----|-------|
| Setembre | 30 | 468,6 |
| Octubre  | 31 | 484,3 |
| Novembre | 30 | 468,6 |
| Desembre | 31 | 484,3 |

Taula 8.2. Consum energètic mensual

Per al càlcul de la calefacció, farem servir una potència de 2000 W. A partir d'aquest valor, i tenint en compte el percentatge d'hores aproximat que funcionarà la calefacció, obtenim la següent taula:

| Mes      | Hores diàries | Energia mensual (kWh) |
|----------|---------------|-----------------------|
| Gener    | 12            | 744                   |
| Febrer   | 12            | 672                   |
| Març     | 8             | 496                   |
| Abril    | 8             | 480                   |
| Maig     | 0             | 0                     |
| Juny     | 0             | 0                     |
| Juliol   | 0             | 0                     |
| Agost    | 0             | 0                     |
| Setembre | 8             | 480                   |
| Octubre  | 8             | 496                   |
| Novembre | 12            | 720                   |
| Desembre | 12            | 744                   |

Taula 8.3. Consum energètic mensual de calefacció

El càlcul per al sistema d'aire condicionat també es realitza per separat per tal de diferenciar amb claredat aquells mesos de l'any en els quals s'utilitza o no el sistema de refrigeració. La potència de funcionament del sistema serà de 2500W. A continuació es mostra l'energia consumida:

| Mes      | Hores diàries | Energia mensual (kWh) |
|----------|---------------|-----------------------|
| Gener    | 0             | 0                     |
| Febrer   | 0             | 0                     |
| Març     | 0             | 0                     |
| Abril    | 0             | 0                     |
| Maig     | 4             | 310                   |
| Juny     | 8             | 600                   |
| Juliol   | 8             | 620                   |
| Agost    | 6             | 465                   |
| Setembre | 0             | 0                     |
| Octubre  | 0             | 0                     |
| Novembre | 0             | 0                     |
| Desembre | 0             | 0                     |



Taula 8.4. Consum energètic mensual d'aire condicionat

A partir de les taules 8.2, 8.3 i 8.4 s'obté el consum mitjà d'energia elèctrica consumida per la instal·lació de la vivenda:

| Mes          | Energia mensual (elèctrica) [kWh] | Energia mensual (calefacció) [kWh] | Energia mensual (A.C.) [kWh] | Energia final [kWh] |
|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| Gener        | 484,3                             | 744                                | 0                            | 1228,3              |
| Febrer       | 437,4                             | 672                                | 0                            | 1109,4              |
| Març         | 484,3                             | 496                                | 0                            | 980,3               |
| Abril        | 468,6                             | 480                                | 0                            | 948,6               |
| Maig         | 484,3                             | 0                                  | 310                          | 794,3               |
| Juny         | 468,6                             | 0                                  | 600                          | 1068,6              |
| Juliol       | 484,3                             | 0                                  | 620                          | 1104,3              |
| Agost        | 484,3                             | 0                                  | 465                          | 949,3               |
| Setembre     | 468,6                             | 480                                | 0                            | 948,6               |
| Octubre      | 484,3                             | 496                                | 0                            | 980,3               |
| Novembre     | 468,6                             | 720                                | 0                            | 1188,6              |
| Desembre     | 484,3                             | 744                                | 0                            | 1228,3              |
| <b>TOTAL</b> | <b>5701,9</b>                     | <b>4832</b>                        | <b>1995</b>                  | <b>12528,9</b>      |

Taula 8.5. Distribució dels consums energètics mensual

Per tant, el consum d'energia anual d'un habitatge serà de 12528,9 kWh. La vivenda s'haurà de dimensionar correctament per tal de satisfer aquesta demanda energètica. A més, caldrà tenir en compte que la instal·lació es pretén realitzar amb energies renovables, motiu pel qual s'haurà de consultar a més del consum global, el consum mensual, ja que als mesos d'hivern, el consum és més elevat i en canvi la producció d'energia a partir d'aquestes fonts serà més baixa.

Un cop realitzada la distribució energètica dels diferents elements que compondran la instal·lació, es pot determinar la potència de la pila de combustible que caldrà utilitzar. Per tal de fer-ho, caldrà realitzar hipòtesis de funcionament de la instal·lació, ja que aquesta mai estarà funcionant amb tots els aparells simultàniament.

| Electrodomèstic     | P (W) | Cos $\varphi$ | Q (var) | S (VA) |
|---------------------|-------|---------------|---------|--------|
| Televisor           | 100   | 0,8           | 75      | 125    |
| Reproductor DVD/VHS | 50    | 0,8           | 37,5    | 62,5   |



|                      |               |     |                 |      |
|----------------------|---------------|-----|-----------------|------|
| Làmpada incandescent | 20            | 1   | 0               | 20   |
| Aire condicionat     | 2.500         | 0,8 | 1875            | 3125 |
| Frigorífic           | 220           | 1   | 0               | 220  |
| Forn                 | 1.477         | 1   | 0               | 1477 |
| Halògena             | 100           | 0,8 | 75              | 125  |
| Fluorescent          | 2 x 36        | 0,9 | 35              | 80   |
|                      | <b>4539 W</b> | -   | <b>2097 var</b> | -    |

Taula 8.6. Hipòtesi de funcionament simultani dels aparells de la instal·lació

|                           | P (W)      | Q (var)    | S (VA)                 |
|---------------------------|------------|------------|------------------------|
| <b>Total instal·lació</b> | $\sum P_i$ | $\sum Q_i$ | $\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}$ |
| <b>Valor</b>              | 4539       | 2097       | 5000                   |

Taula 8.7. Càlcul de la potència

Per tant, a partir de l'anterior hipòtesi, la potència de les piles de combustible haurà de ser de 5 kW. Cal tenir en compte que aquesta hipòtesi únicament és una aproximació als possibles usos que hi poden haver a les vivendes. Malgrat això, si els usuaris necessiten instal·lar més potència elèctrica es pot augmentar el nombre de piles de combustible, afegint-les en paral·lel. Cal considerar que aquesta potència elèctrica per a les piles de combustible, implica a l'hora la utilització d'un inversor de tensió de també 5kW.

Un cop definida la potència de les piles de combustible cal dimensionar la instal·lació. Aquest es farà en funció de la irradiació solar rebuda i la producció d'energia eòlica a les comarques del Berguedà i de Tarragona. A continuació es mostra la irradiació mitja per a les dues comarques estudiades, obtingudes a partir del *Atlas Climàtic Digital de Catalunya*:

| Mes      | Irradiació mitja (Berguedà) [kWh/m <sup>2</sup> ] | Irradiació mitja (Tarragona) [kWh/m <sup>2</sup> ] |
|----------|---|--|
| Gener    | 40,21   | 51,32  |
| Febrer   | 63,78   | 71,63  |
| Març     | 120,20  | 124,95   |
| Abril    | 135,92  | 163,17   |
| Maig     | 191,08  | 200,29   |
| Juny     | 196,58  | 207,50   |
| Juliol   | 184,11  | 206,24   |
| Agost    | 155,17  | 181,01   |
| Setembre | 108,50  | 138,33   |
| Octubre  | 67,51   | 96,44  |



|              |         |         |
|--------------|---------|---------|
| Novembre     | 33,67   | 58,58   |
| Desembre     | 33,60   | 41,51   |
| <b>TOTAL</b> | 1330,33 | 1540,97 |

Taula 8.8. Irradiació mitjana mensual per cadascuna de les comarques.

La producció d'energia eòlica s'obté com s'indica a continuació:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

on  $\rho$  és la densitat del vent,  $v$  la velocitat del vent i  $D$  el diàmetre de les pales.

A la següent taula es mostren aquests valors per a les dues comarques on s'està realitzant l'estudi:

|        | Berguedà              | Tarragona |
|--------|-----------------------|-----------|
| $\rho$ | 1,2 kg/m <sup>3</sup> |           |
| $v$    | 2,5 m/s               | 6 m/s     |
| $\eta$ | 10%                   | 30%       |
| $D$    | Variable              |           |
| $P$    | Variable              |           |

Taula 8.9. Descripció de les variables eòliques de les diferents comarques

La diferència entre els rendiments dels dos aerogeneradors a col·locar a cascuna de les vivendes és degut principalment al coeficient de potència que es pot desenvolupar a partir d'aquestes velocitats del vent.

Per tal de determinar el rendiment de la instal·lació cal tenir en compte quin és el treball del compressor. A continuació es mostra els diferents rendiments de la instal·lació, sense considerar el compressor. (El valor del rendiment tèrmic de la pila de combustible s'explica a l'annex D).

| Element                | Rendiment |
|------------------------|-----------|
| Plaques fotovoltaïques | 30%       |
| Aerogenerador          | -         |
| Convertidor de tensió  | 95%       |



|                       |                 |
|-----------------------|-----------------|
| Electrolitzador       | 85%             |
| Pila de combustible   | 45% (elèctric)  |
|                       | 19,36% (tèrmic) |
| Bescanviador de calor | 98%             |
| Inversor              | 95%             |

Taula 8.10. Rendiments dels diferents elements de la instal·lació

Coneixent el consum d'energia total, i el rendiment dels diferents elements que componen la instal·lació, podem determinar el rendiment del compressor.

$$Energia a comprimir = \frac{\text{Consum energètic anual}}{\eta_{\text{inversor}} \cdot \eta_{\text{elèctric de la PC}} + \eta_{\text{tèrmic de la PC}} \cdot \eta_{\text{bescanviador}}}$$

Substituint els valor enunciats anteriorment obtenim els següents resultats:

$$Energia a comprimir = \frac{12528,9}{0,95 \cdot 0,45 + 0,195 \cdot 0,98} = 20298,7 \text{ kWh}$$

Tenint en compte que l'equivalència entre l'energia emmagatzemada i el seu volum és de  $1 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2 = 3 \text{ kWh}$ , obtenim que el volum en condicions normal serà de:

$$20298,7 \text{ kWh} \cdot \frac{1 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2}{3 \text{ kWh}} = 6766,2 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2$$

A partir d'aquest resultat i tenint en compte el factor de compressibilitat que es mostra a la següent taula, calculem el volum total d'hidrogen a comprimir:

| Pressió (MPa) | Factor de compressibilitat |
|---------------|----------------------------|
| 0,1           | 1                          |
| 1             | 1,0059                     |
| 5             | 1,032                      |
| 10            | 1,065                      |
| 20            | 1,132                      |



|    |       |
|----|-------|
| 25 | 1,175 |
|----|-------|

Taula 8.11. Variació del factor de compressibilitat en funció de la pressió

$$\text{Volum d'hidrogen} = 6766,2 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2 \cdot \frac{1,0059}{1 \text{ MPa}} \cdot \frac{0,1 \text{ MPa}}{1 \text{ Nm}^3} = 680,6 \frac{\text{m}^3 \text{ H}_2}{\text{any}}$$

Per tant, la quantitat d'hidrogen a comprimir anualment serà de 680,6 m<sup>3</sup> a la pressió de 1 MPa.

A continuació es procedeix a realitzar el càlcul del rendiment global del sistema sense considerar el sistema d'emmagatzematge:

$$\eta_{\text{sense compressor}} = \eta_{\text{elèctric}} + \eta_{\text{termic}} = (\eta_{\text{aerogenerador}} + \eta_{\text{placa fotovoltaica}}) \cdot \eta_{\text{conv.}} \cdot \eta_{\text{electrolític}} \cdot (\eta_{\text{elec. PC}} \cdot \eta_{\text{invers.}} + \eta_{\text{termic PC}} \cdot \eta_{\text{beucany}})$$

Tenint en compte l'expressió anterior, obtenim un rendiment global del sistema sense considerar el sistema d'emmagatzematge del 19,9% per a la vivenda del Berguedà (amb un aerogenerador amb eficiència del 10%), i un rendiment del 29,9% a la vivenda de Tarragona (amb un aerogenerador amb eficiència del 30%).

A continuació es mostren les dades tècniques del compressor que comporten un major interès cara a l'estudi que s'està realitzant:

| Model HQ15 CompAir |                        |
|--------------------|------------------------|
| Pressió sortida    | 250 bar                |
| Flux sortida       | 11,6 m <sup>3</sup> /h |
| Potència           | 4 kW                   |

Taula 8.12. Principals característiques del compressor. (Font: CompAir)

$$\text{Consum compressor} = 680,6 \text{ m}^3 \cdot \frac{1 \text{ h}}{11,6 \text{ m}^3} \cdot 4 \text{ kW} = 234,7 \text{ kWh}$$

Amb el valor del consum del compressor determinat, ja es pot determinar quina serà la superfície de plaques fotovoltaiques a instal·lar amb un cert diàmetre dels àleps de l'aerogenerador fixat. Per tant, a partir d'aquest moment, els resultats seran diferents en funció de la instal·lació i de la vivenda. Per calcular la superfície s'utilitzarà la següent expressió:



$$m^2 \text{ de plaques solars} = \frac{\frac{\text{Energia total} + \text{Consum compressor}}{\eta_{\text{sense compressor}}} - E_{\text{eolica}}}{\text{Irradiacio total}}$$

Un cop obtinguts els metres quadrats de plaques solar que necessitarà la instal·lació, serà necessari determinar el rendiment global de la instal·lació, per tal de poder obtenir posteriorment els excedents mensuals d'energia:

$$\eta_{\text{GLOBAL}} = \frac{\text{Energia anual consumida}}{\text{Energia solar} + \text{Energia eolica}}$$

A partir d'aquests comentaris, es pot procedir a realitzar la iteració. Cal considerar que s'ha realitzat l'estudi per a valors de diàmetre dels àleps de l'aerogenerador de 1, 2, 3 i 4 metres. A més, s'ha considerat també el cas en que no hi hagués aerogenerador (diàmetre nul), per tal de comprovar el grau d'aportació que representa el fet d'haver-hi un aerogenerador de vent a la instal·lació. Com es pot comprovar a continuació, els resultats són prou interessants:

| Berguedà                         | Sense aerogenerador  | D = 1 m              | D = 2 m              | D = 3 m              | D = 4 m              |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| m <sup>2</sup> de plaques solars | 64,17 m <sup>2</sup> | 48,08 m <sup>2</sup> | 47,93 m <sup>2</sup> | 47,69 m <sup>2</sup> | 47,35 m <sup>2</sup> |
| Rendiment de la instal·lació     | 14,7%                | 19,6%                |                      |                      |                      |

Taula 8.13. Variació de la superfície fotovoltaica i el rendiment de la instal·lació en funció del diàmetre dels àleps de l'aerogenerador a la comarca del Berguedà

| Tarragona                        | Sense aerogenerador  | D = 1 m              | D = 2 m              | D = 3 m              | D = 4 m              |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| m <sup>2</sup> de plaques solars | 55,40 m <sup>2</sup> | 27,12 m <sup>2</sup> | 25,38 m <sup>2</sup> | 22,49 m <sup>2</sup> | 18,44 m <sup>2</sup> |
| Rendiment de la instal·lació     | 14,7%                | 29,2%                |                      |                      |                      |





Taula 8.14. Variació de la superfície fotovoltaica i el rendiment de la instal·lació en funció del diàmetre dels àleps de l'aerogenerador a la comarca de Tarragona

Per tant, es pot observar que en el cas de la vivenda del Berguedà, la instal·lació d'un aerogenerador implica un benefici en l'estalvi de metres quadrats de plaques solars, a banda de que el rendiment de la instal·lació continua sent molt baix; mentre que en la vivenda de Tarragona, en tenir una energia eòlica considerablement major, la diferència entre tenir un aerogenerador amb àleps de 4 metres de diàmetre i no, és d'un estalvi de gairebé 40 metres quadrats de plaques solars.

Un cop fet aquests càlculs, cal dimensionar els volums d'hidrogen que caldrà emmagatzemar anualment per tal de mantenir el consum de la casa. Per tal de fer-ho, caldrà realitzar en cada cas el càlcul dels excedents energètics mensuals. Això es farà individualment per a cadascuna de les solucions escollides. Abans d'això cal explicar com es calcula la producció d'energia solar fotovoltaica mensual, l'energia eòlica i l'excedent energètic:

$$Energia\ solar = Irradiacio\ mensual \cdot Superfície$$

$$Energia\ eòlica = Potència\ eòlica \cdot \frac{x\ dies}{mes} \cdot \frac{24\ hores}{dia}$$

$$Excedent = Consum - (Energia\ solar + Energia\ eòlica) \cdot \eta_{GLOBAL}$$

A partir de les següents equacions, trobem els resultats que es mostren a continuació. Cal comentar que les taules que es mostren a continuació estan separades per als diferents diàmetres que s'han plantejat per als àleps de l'aerogenerador.

| Mes      | Consum energia [kWh] | Producció d'energia solar fotovoltaica [kWh] | Producció d'energia eòlica [kWh] | Excedent d'energia [kWh] |
|----------|----------------------|--|----------------------------------|--------------------------|
| Gener    | 1228,3               | 1903,9                                       | 87,7                             | 838,6                    |
| Febrer   | 1109,4               | 3019,9                                       | 79,2                             | 502,9                    |
| Març     | 980,3                | 5691,3                                       | 87,7                             | -150,6                   |
| Abril    | 948,6                | 6435,6                                       | 84,8                             | -327,4                   |
| Maig     | 794,3                | 9047,4                                       | 87,7                             | -993,4                   |
| Juny     | 1068,6               | 9307,8                                       | 84,8                             | -769,5                   |
| Juliol   | 1104,3               | 8717,4                                       | 87,7                             | -618,8                   |
| Agost    | 949,3                | 7347,1                                       | 87,7                             | -505,7                   |
| Setembre | 948,6                | 5137,3                                       | 84,8                             | -73,4                    |



|          |        |        |      |       |
|----------|--------|--------|------|-------|
| Octubre  | 980,3  | 3169,5 | 87,7 | 337,6 |
| Novembre | 1188,6 | 1594,2 | 84,8 | 860,0 |
| Desembre | 1228,3 | 1590,9 | 87,7 | 899,8 |

Taula 8.15. Excedent energètic a la vivenda del Berguedà amb un aerogenerador de 4m de diàmetre i 47,35 m<sup>2</sup> de plaques solars

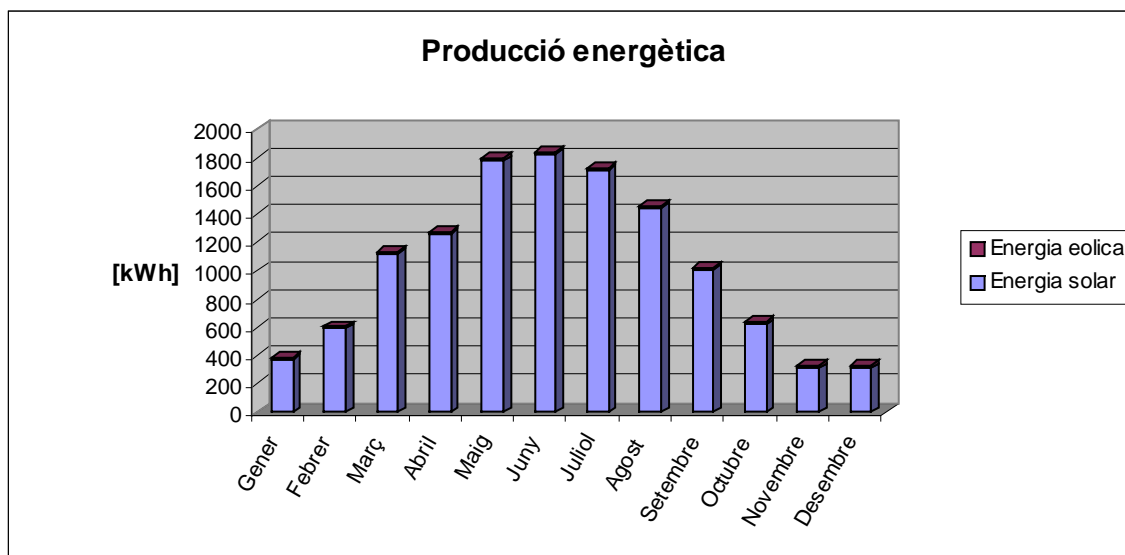
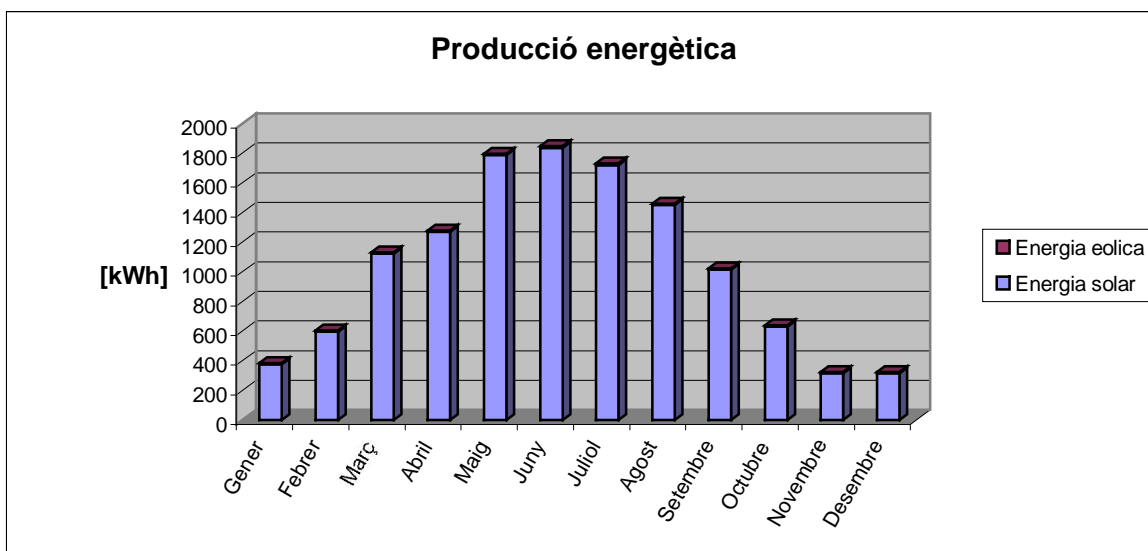


Fig. 8.1. Producció energètica mensual amb un aerogenerador de 4m de diàmetre i 47,35 m<sup>2</sup> de plaques solars

| Mes      | Consum energia [kWh] | Producció d'energia solar fotovoltaica [kWh] | Producció d'energia eòlica [kWh] | Excedent d'energia [kWh] |
|----------|----------------------|--|----------------------------------|--------------------------|
| Gener    | 1332,6               | 1917,5                                       | 49,3                             | 843,4                    |
| Febrer   | 1203,6               | 3041,5                                       | 44,5                             | 505,5                    |
| Març     | 960,6                | 5732,1                                       | 49,3                             | -151,1                   |
| Abril    | 929,6                | 6481,8                                       | 47,7                             | -329,2                   |
| Maig     | 836,6                | 9112,2                                       | 49,3                             | -998,6                   |
| Juny     | 809,6                | 9374,5                                       | 47,7                             | -775,3                   |
| Juliol   | 836,6                | 8779,8                                       | 49,3                             | -623,6                   |
| Agost    | 836,6                | 7399,8                                       | 49,3                             | -508,5                   |
| Setembre | 929,6                | 5174,2                                       | 47,7                             | -73,3                    |
| Octubre  | 960,6                | 3219,4                                       | 49,3                             | 340,6                    |
| Novembre | 1289,6               | 1605,7                                       | 47,7                             | 865,0                    |
| Desembre | 1332,6               | 1602,3                                       | 49,3                             | 905,1                    |



Taula 8.16. Excedent energètic a la vivenda del Berguedà amb un aerogenerador de 3m de diàmetre i 47,69m<sup>2</sup> de plaques solarsFig. 8.2. Producció energètica mensual amb un aerogenerador de 3m de diàmetre i 47,69m<sup>2</sup> de plaques solars

| Mes      | Consum energia [kWh] | Producció d'energia solar fotovoltaica [kWh] | Producció d'energia eòlica [kWh] | Excedent d'energia [kWh] |
|----------|----------------------|--|----------------------------------|--------------------------|
| Gener    | 1332,6               | 1927,3                                       | 21,9                             | 846,8                    |
| Febrer   | 1203,6               | 3057,0                                       | 19,8                             | 507,3                    |
| Març     | 960,6                | 5761,0                                       | 21,9                             | -151,5                   |
| Abril    | 929,6                | 6514,7                                       | 21,2                             | -330,5                   |
| Maig     | 836,6                | 9158,6                                       | 21,9                             | -1002,3                  |
| Juny     | 809,6                | 9422,2                                       | 21,2                             | -779,5                   |
| Juliol   | 836,6                | 8824,5                                       | 21,9                             | -626,9                   |
| Agost    | 836,6                | 7437,4                                       | 21,9                             | -510,5                   |
| Setembre | 929,6                | 5200,5                                       | 21,2                             | -73,3                    |
| Octubre  | 960,6                | 3235,8                                       | 21,9                             | 342,8                    |
| Novembre | 1289,6               | 1613,8                                       | 21,2                             | 868,6                    |
| Desembre | 1332,6               | 1610,5                                       | 21,9                             | 908,8                    |

Taula 8.17. Excedent energètic a la vivenda del Berguedà amb un aerogenerador de 2m de diàmetre i 47,93m<sup>2</sup> de plaques solars

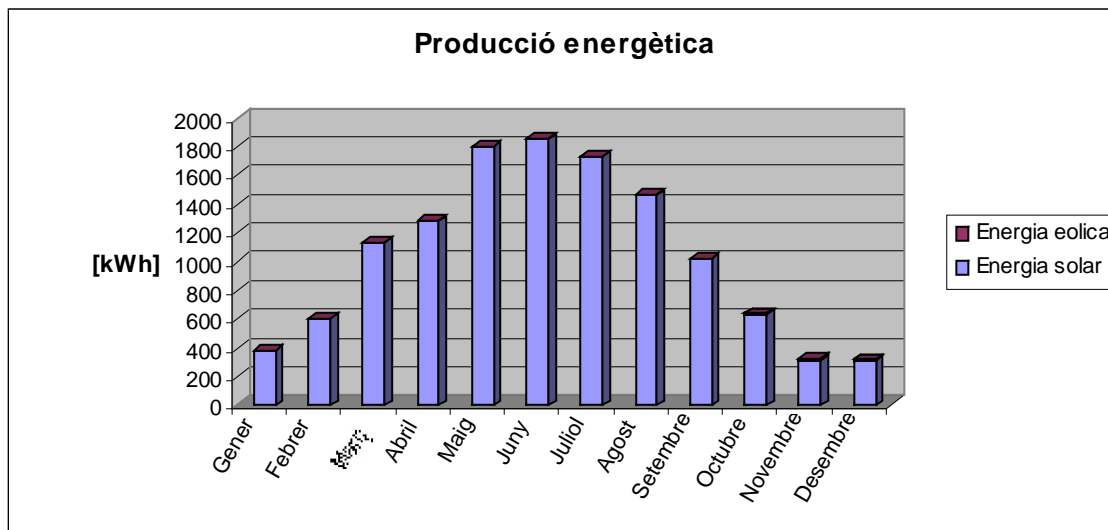


Fig. 8.3. Producció energètica mensual amb un aerogenerador de 2m de diàmetre i 47,93m<sup>2</sup> de plaques solars

| Mes      | Consum energia [kWh] | Producció d'energia solar fotovoltaica [kWh] | Producció d'energia eòlica [kWh] | Excedent d'energia [kWh] |
|----------|----------------------|--|----------------------------------|--------------------------|
| Gener    | 1332,6               | 1933,1                                       | 5,5                              | 848,9                    |
| Febrer   | 1203,6               | 3066,3                                       | 4,9                              | 508,4                    |
| Març     | 960,6                | 5778,7                                       | 5,5                              | -151,7                   |
| Abril    | 929,6                | 6534,5                                       | 5,3                              | -331,2                   |
| Maig     | 836,6                | 9186,3                                       | 5,5                              | -1004,5                  |
| Juny     | 809,6                | 9450,8                                       | 5,3                              | -781,9                   |
| Juliol   | 836,6                | 8851,3                                       | 5,5                              | -629,0                   |
| Agost    | 836,6                | 7459,9                                       | 5,5                              | -511,7                   |
| Setembre | 929,6                | 5216,2                                       | 5,3                              | -73,2                    |
| Octubre  | 960,6                | 3245,6                                       | 5,5                              | 344,1                    |
| Novembre | 1289,6               | 1618,7                                       | 5,3                              | 870,8                    |
| Desembre | 1332,6               | 1615,4                                       | 5,5                              | 911,1                    |

Taula 8.18. Excedent energètic a la vivenda del Berguedà amb un aerogenerador de 1m de diàmetre i 48,08m<sup>2</sup> de plaques solars



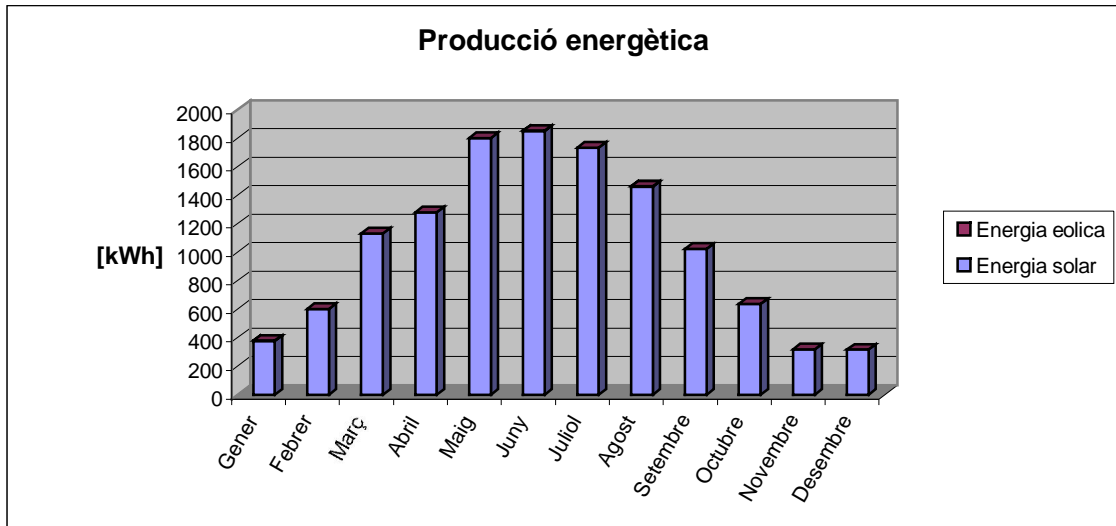


Fig. 8.4. Producció energètica mensual amb un aerogenerador de 1m de diàmetre i 48,08m<sup>2</sup> de plaques solars

| Mes      | Consum energia [kWh] | Producció d'energia solar fotovoltaica [kWh] | Excedent d'energia [kWh] |
|----------|----------------------|--|--------------------------|
| Gener    | 1332,6               | 2580,1                                       | 849,6                    |
| Febrer   | 1203,6               | 4092,5                                       | 508,7                    |
| Març     | 960,6                | 7712,7                                       | -151,7                   |
| Abril    | 929,6                | 8712,4                                       | -331,5                   |
| Maig     | 836,6                | 12260,8                                      | -1005,3                  |
| Juny     | 809,6                | 12613,7                                      | -782,8                   |
| Juliol   | 836,6                | 11813,6                                      | -629,6                   |
| Agost    | 836,6                | 9956,6                                       | -512,1                   |
| Setembre | 929,6                | 6962,0                                       | -73,2                    |
| Octubre  | 960,6                | 4331,8                                       | 344,5                    |
| Novembre | 1289,6               | 2160,5                                       | 871,5                    |
| Desembre | 1332,6               | 2156,0                                       | 911,9                    |

Taula 8.19. Excedent energètic a la vivenda del Berguedà sense aerogenerador amb 64,17m<sup>2</sup> de plaques solars

Per al primer dels casos descrits, amb un aerogenerador de 4m de diàmetre i 27,03m<sup>2</sup> de plaques solars, l'excedent es calcularà com s'indica a continuació:



$$Excedent = (838,6 + 502,9 + 337,6 + 860,0 + 899,8) kWh = 3438,9 kWh$$

Tenint en compte els rendiments del inversor, el bescanviador de calor i la pila de combustible, el valor d'excedent màxim serà:

$$Maxim\ excedent = \frac{Excedent\ d'energia}{\eta_{inversor} \cdot \eta_{elèctric\ PC} + \eta_{termic\ PC} \cdot \eta_{bescanviador}}$$

A partir de l'anterior definició i dels valors anteriorment trobats, obtenim que el valor del màxim excedent d'energia és el següent:

$$Maxim\ excedent = \frac{3438,9 kWh}{0,95 \cdot 0,45 + 0,1936 \cdot 0,98} = 5571,5 kWh$$

Un cop obtinguts l'excedent màxim es calcula quin ha de ser el volum corresponent:

$$5571,5 kWh\ d'H_2 \cdot \frac{1 Nm^3 H_2}{3 kWh} = 1857,2 Nm^3 H_2$$

$$Volum\ d'hidrogen = 1857,2 Nm^3 H_2 \cdot \frac{1,175}{25 MPa} \cdot \frac{0,1 MPa}{1 Nm^3} = 8,73 m^3 H_2$$

Realitzant aquestes operacions amb cadascuna de les altres solucions de la casa del Berguedà, s'obtenen els següents resultats:

| Característiques   | Excedent energètic [kWh] | Màxim excedent [kWh] | Volum d'hidrogen [m <sup>3</sup> ] |
|--|--------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Sense aerogenerador<br>64,17m <sup>2</sup> de plaques solars | 3486,2                   | 5648,1               | 8,85                               |



|   |        |        |      |
|---|--------|--------|------|
| <b>D= 1m<br/>48,08m<sup>2</sup> de<br/>plaques solars</b> | 3483,2 | 5643,4 | 8,84 |
| <b>D= 2m<br/>47,93m<sup>2</sup> de<br/>plaques solars</b> | 3474,4 | 5629,0 | 8,82 |
| <b>D= 3m<br/>47,69m<sup>2</sup> de<br/>plaques solars</b> | 3459,6 | 5605,0 | 8,78 |
| <b>D= 4m<br/>47,35m<sup>2</sup> de<br/>plaques solars</b> | 3438,9 | 5571,5 | 8,73 |

Taula 8.20. Càlcul dels excedents energètics i volums dels dipòsits d'hidrogen de la vivenda del Berguedà.

Clarament, s'observa en aquest cas que l'augment del diàmetre dels àleps de l'aerogenerador no comporta pas un estalvi en superfície solar, tot i que cal puntualitzar que amb la instal·lació d'un aerogenerador d'un metre de diàmetre als àleps, l'estalvi en plaques solars ja és gairebé de 15 m<sup>2</sup>.

A continuació es realitzarà el mateix estudi per a la vivenda de la comarca de Tarragona:

| <b>Mes</b> | <b>Consum energia<br/>[kWh]</b> | <b>Producció<br/>d'energia solar<br/>fotovoltaica<br/>[kWh]</b> | <b>Producció<br/>d'energia eòlica<br/>[kWh]</b> | <b>Excedent<br/>d'energia<br/>[kWh]</b> |
|------------|---------------------------------|---|---|---|
| Gener      | 1332,6                          | 946,3   | 1211,68   | 594,8                                   |
| Febrer     | 1203,6                          | 1320,8  | 1094,42   | 400,4                                   |
| Març       | 960,6                           | 2304,0  | 1211,68   | -51,7                                   |
| Abril      | 929,6                           | 3008,7  | 1172,59   | -278,8                                  |
| Maig       | 836,6                           | 3693,2  | 1211,68   | -645,5                                  |
| Juny       | 809,6                           | 3826,1  | 1172,59   | -398,8                                  |
| Juliol     | 836,6                           | 3802,9  | 1211,68   | -367,7                                  |
| Agost      | 836,6                           | 3337,7  | 1211,68   | -386,2                                  |
| Setembre   | 929,6                           | 2550,7  | 1172,59   | -144,4                                  |
| Octubre    | 960,6                           | 1778,3  | 1211,68   | 102,6                                   |
| Novembre   | 1289,6                          | 1080,2  | 1172,59   | 527,3                                   |
| Desembre   | 1332,6                          | 765,4   | 1211,68   | 647,9                                   |

Taula 8.21. Excedent energètic a la vivenda de Tarragona amb un aerogenerador de 4m de diàmetre i 18,44m<sup>2</sup> de plaques solars

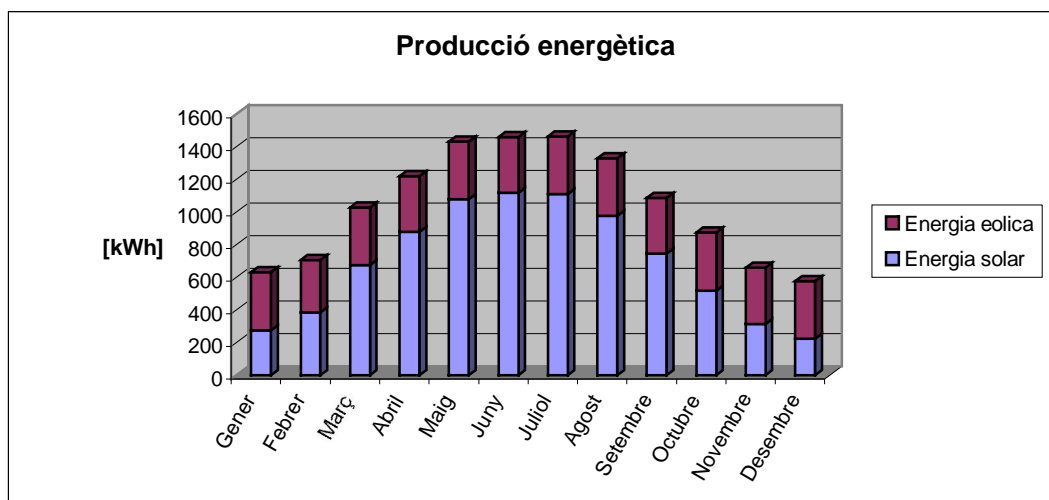


Fig. 8.5. Producció energètica mensual amb un aerogenerador de 4m de diàmetre i 18,44m<sup>2</sup> de plaques solars

| Mes      | Consum energia [kWh] | Producció d'energia solar fotovoltaica [kWh] | Producció d'energia eòlica [kWh] | Excedent d'energia [kWh] |
|----------|----------------------|--|----------------------------------|--------------------------|
| Gener    | 1332,6               | 1154,2                                       | 681,57                           | 689,4                    |
| Febrer   | 1203,6               | 1610,9                                       | 615,61                           | 455,8                    |
| Març     | 960,6                | 2810,1                                       | 681,57                           | -44,7                    |
| Abril    | 929,6                | 3669,6                                       | 659,84                           | -322,2                   |
| Maig     | 836,6                | 4504,5                                       | 681,57                           | -728,1                   |
| Juny     | 809,6                | 4666,6                                       | 659,84                           | -494,9                   |
| Juliol   | 836,6                | 4638,3                                       | 681,57                           | -457,3                   |
| Agost    | 836,6                | 4070,9                                       | 681,57                           | -445,8                   |
| Setembre | 929,6                | 3111,0                                       | 659,84                           | -158,2                   |
| Octubre  | 960,6                | 2168,9                                       | 681,57                           | 143,5                    |
| Novembre | 1289,6               | 1317,4                                       | 659,84                           | 608,2                    |
| Desembre | 1332,6               | 933,5  | 681,57                           | 754,2                    |

Taula 8.22. Excedent energètic a la vivenda de Tarragona amb un aerogenerador de 3m de diàmetre i 22,49m<sup>2</sup> de plaques solars





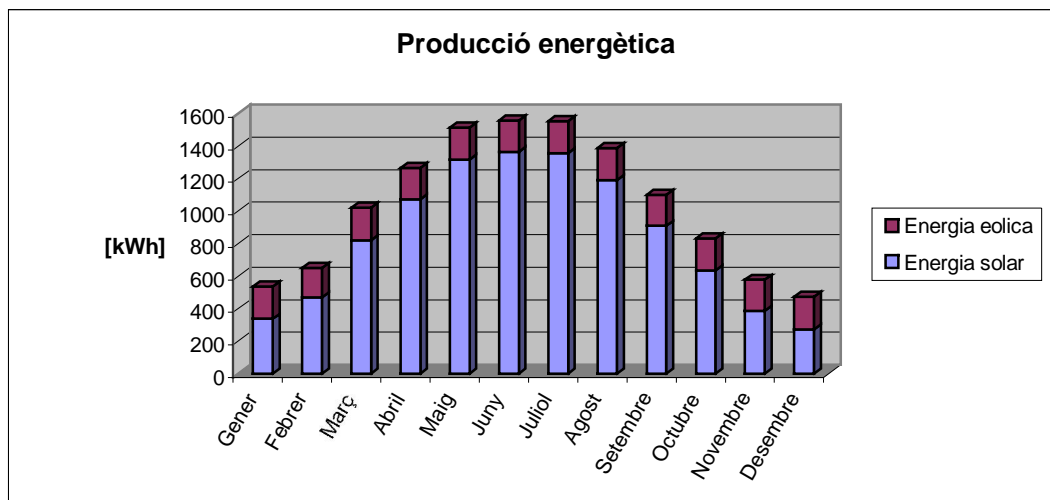


Fig. 8.6. Producció energètica mensual amb un aerogenerador de 3m de diàmetre i 22,49m<sup>2</sup> de plaques solars

| Mes      | Consum energia [kWh] | Producció d'energia solar fotovoltaica [kWh] | Producció d'energia eòlica [kWh] | Excedent d'energia [kWh] |
|----------|----------------------|--|----------------------------------|--------------------------|
| Gener    | 1332,6               | 1302,7                                       | 302,92                           | 757,0                    |
| Febrer   | 1203,6               | 1818,2                                       | 273,61                           | 495,4                    |
| Març     | 960,6                | 3171,6                                       | 302,92                           | -39,6                    |
| Abril    | 929,6                | 4141,7                                       | 293,15                           | -353,2                   |
| Maig     | 836,6                | 5083,9                                       | 302,92                           | -787,0                   |
| Juny     | 809,6                | 5266,9                                       | 293,15                           | -563,6                   |
| Juliol   | 836,6                | 5235,0                                       | 302,92                           | -521,3                   |
| Agost    | 836,6                | 4594,6                                       | 302,92                           | -488,3                   |
| Setembre | 929,6                | 3511,2                                       | 293,15                           | -168,2                   |
| Octubre  | 960,6                | 2447,9                                       | 302,92                           | 172,8                    |
| Novembre | 1289,6               | 1486,9                                       | 293,15                           | 666,1                    |
| Desembre | 1332,6               | 1053,6                                       | 302,92                           | 830,1                    |

Taula 8.23. Excedent energètic a la vivenda de Tarragona amb un aerogenerador de 2m de diàmetre i 25,38m<sup>2</sup> de plaques solars



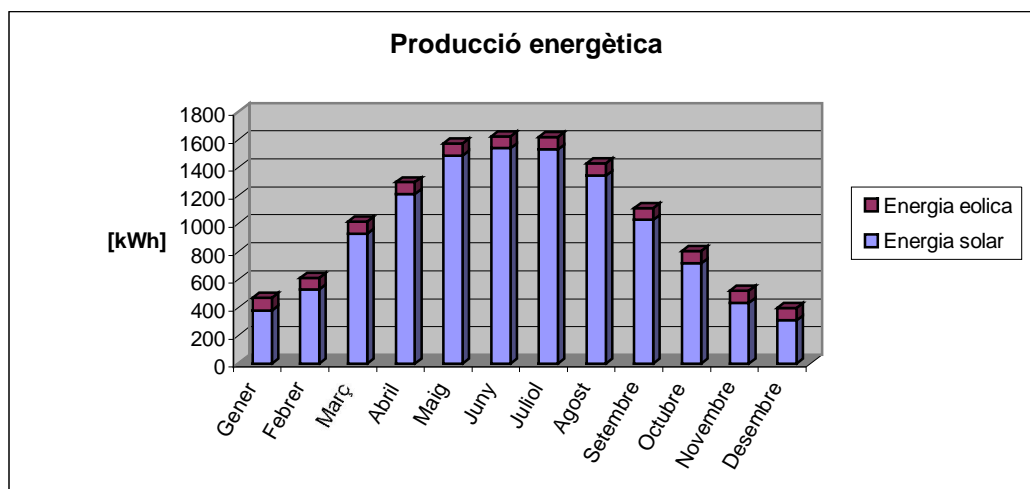


Fig. 8.7. Producció energètica mensual amb un aerogenerador de 2m de diàmetre i 25,38m<sup>2</sup> de plaques solars

| Mes      | Consum energia [kWh] | Producció d'energia solar fotovoltaica [kWh] | Producció d'energia eòlica [kWh] | Excedent d'energia [kWh] |
|----------|----------------------|--|----------------------------------|--------------------------|
| Gener    | 1332,6               | 1391,7                                       | 75,73                            | 797,5                    |
| Febrer   | 1203,6               | 1942,5                                       | 68,40                            | 519,1                    |
| Març     | 960,6                | 3388,5                                       | 75,73                            | -36,6                    |
| Abril    | 929,6                | 4425,0                                       | 73,29                            | -371,9                   |
| Maig     | 836,6                | 5431,6                                       | 75,73                            | -822,4                   |
| Juny     | 809,6                | 5627,1                                       | 73,29                            | -604,8                   |
| Juliol   | 836,6                | 5593,0                                       | 75,73                            | -559,7                   |
| Agost    | 836,6                | 4908,8                                       | 75,73                            | -513,9                   |
| Setembre | 929,6                | 3751,3                                       | 73,29                            | -174,1                   |
| Octubre  | 960,6                | 2615,3                                       | 75,73                            | 190,3                    |
| Novembre | 1289,6               | 1588,6                                       | 73,29                            | 700,8                    |
| Desembre | 1332,6               | 1125,7                                       | 75,73                            | 875,6                    |

Taula 8.24. Excedent energètic a la vivenda de Tarragona amb un aerogenerador de 1m de diàmetre i 27,12m<sup>2</sup> de plaques solars



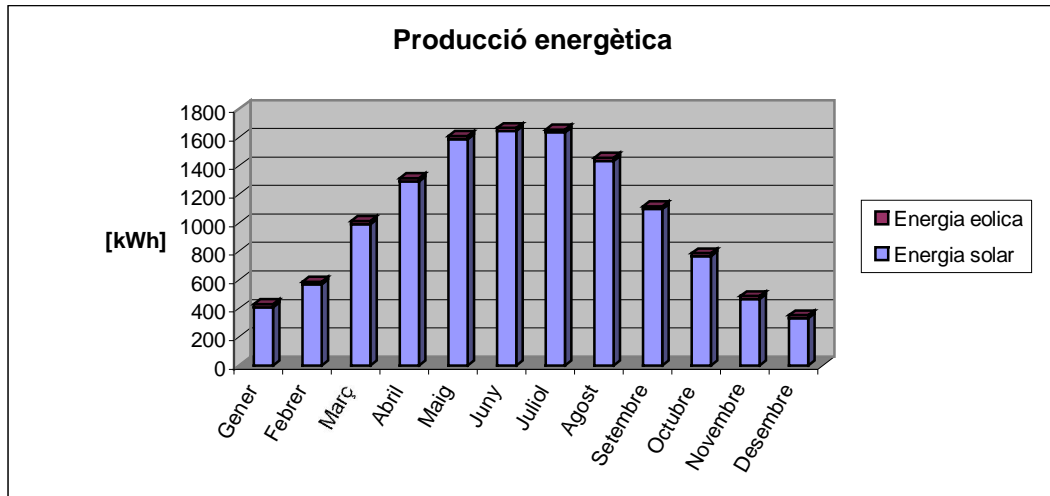


Fig. 8.8. Producció energètica mensual amb un aerogenerador de 1m de diàmetre i 27,12m<sup>2</sup> de plaques solars

| Mes      | Consum energia [kWh] | Producció d'energia solar fotovoltaica [kWh] | Excedent d'energia [kWh] |
|----------|----------------------|--|--------------------------|
| Gener    | 1332,6               | 2842,9                                       | 811,0                    |
| Febrer   | 1203,6               | 3967,9                                       | 527,0                    |
| Març     | 960,6                | 6921,6                                       | -35,6                    |
| Abril    | 929,6                | 9038,8                                       | -378,1                   |
| Maig     | 836,6                | 11095,0                                      | -834,2                   |
| Juny     | 809,6                | 11494,4                                      | -618,5                   |
| Juliol   | 836,6                | 11424,6                                      | -572,5                   |
| Agost    | 836,6                | 10027,0                                      | -522,4                   |
| Setembre | 929,6                | 7662,8                                       | -176,1                   |
| Octubre  | 960,6                | 5342,3                                       | 196,2                    |
| Novembre | 1289,6               | 3245,0                                       | 712,3                    |
| Desembre | 1332,6               | 2299,4                                       | 890,8                    |

Taula 8.25. Excedent energètic a la vivenda de Tarragona sense aerogenerador i amb 55,40 m<sup>2</sup> de plaques solars

Fent el mateix procediment descrit anteriorment per al càlcul del volum d'hidrogen a emmagatzemar, s'obtenen els següents resultats:

| Característiques | Excedent energètic [kWh] | Màxim excedent [kWh] | Volum d'hidrogen [m <sup>3</sup> ] |
|------------------|--------------------------|----------------------|------------------------------------|
|                  |                          |                      |                                    |



|  |        |        |      |
|--|--------|--------|------|
| <b>Sense aerogenerador<br/>55,40 m<sup>2</sup> de plaques solars</b> | 3137,4 | 5083,0 | 7,96 |
| <b>D= 1m<br/>27,12 m<sup>2</sup> de plaques solars</b>               | 3083,3 | 4995,5 | 7,83 |
| <b>D= 2m<br/>25,38 m<sup>2</sup> de plaques solars</b>               | 2921,3 | 4732,9 | 7,42 |
| <b>D= 3m<br/>22,49 m<sup>2</sup> de plaques solars</b>               | 2651,2 | 4295,3 | 6,73 |
| <b>D= 4m<br/>18,44 m<sup>2</sup> de plaques solars</b>               | 2273,1 | 3682,7 | 5,77 |

Taula 8.26. Càlcul dels excedents energètics i volums dels dipòsits d'hidrogen de la vivenda de Tarragona.

En aquest cas, a diferència del de la vivenda del Berguedà, es considera prou útil energèticament parlant la instal·lació del aerogenerador, ja que aquest fa reduir pràcticament 40 metres quadrats de superfície solar i més de 2m<sup>3</sup> del volum del dipòsit d'hidrogen.

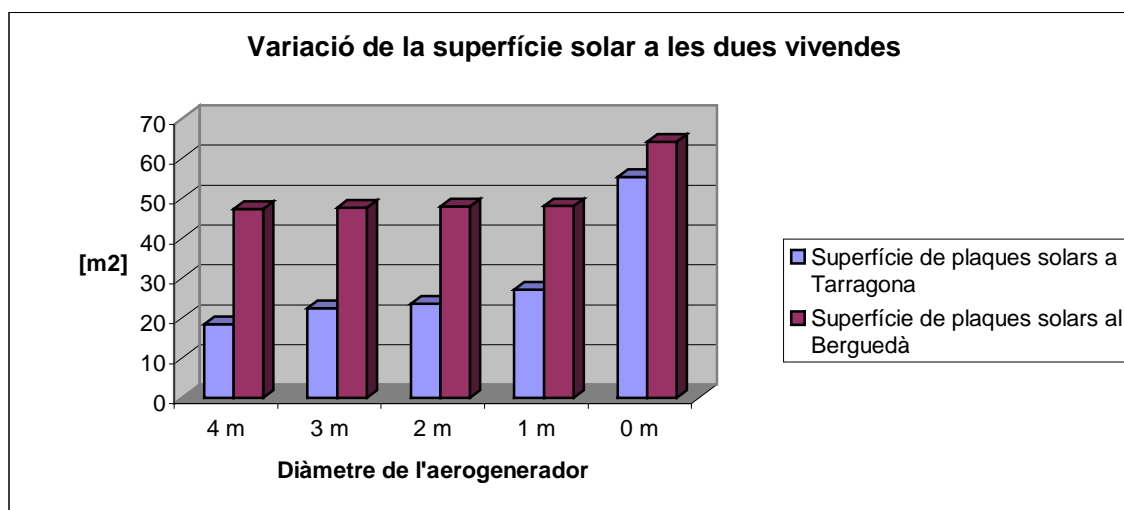


Fig. 8.9. Variació de la superfície solar en funció del diàmetre de l'aerogenerador a les dues vivendes.

A l'anterior gràfic es pot comprovar com varia de forma més notable la superfície a instal·lar de plaques fotovoltaïques a la instal·lació de Tarragona que no pas a la del Berguedà quan augmentem el diàmetre dels àleps de l'aerogenerador. Aquest fenomen també s'observa al posterior gràfic, en relació amb el volum a emmagatzemar pels dipòsits.



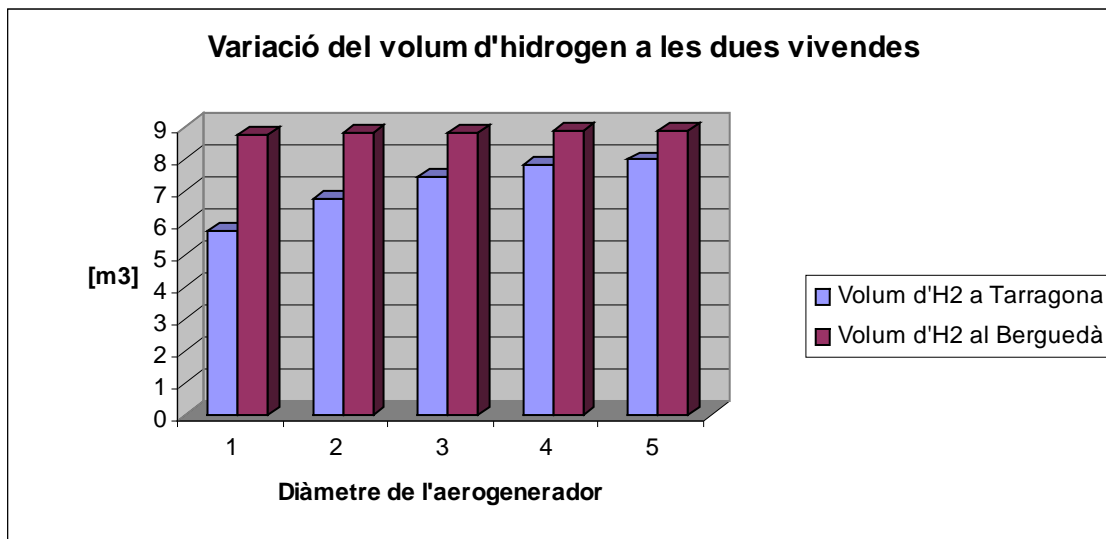


Fig. 8.10. Variació del volum del depòsit d'hidrogen necessari en funció del diàmetre de l'aerogenerador a les dues vivendes.



## 9. ESTUDI ALTERNATIU – INSTAL·LACIÓ AMB CALDERA DE GAS

A continuació es planteja una alternativa consistent en la utilització d'una caldera de gas propà per a la calefacció i la cuina. El subministrament elèctric de l'habitatge es seguirà realitzant a partir de les piles de combustible. La utilització d'una caldera de gas hauria d'augmentar considerablement el rendiment global de la instal·lació, fent així una instal·lació econòmicament més viable.

A l'hora de fer el dimensionat de la instal·lació, caldrà diferenciar entre l'energia o consum que haurà de satisfer la caldera de gas i la que s'haurà de satisfer amb piles de combustible. Es considera que l'energia consumida per a cuinar (forn) serà produïda ara per la caldera de gas propà.

| Mes      | Energia elèctrica (mensual) [kWh] | Energia A.C. (mensual) [kWh] | Energia a produir per piles combustible (mensual) [kWh] | Energia cuina (mensual) [kWh] | Energia Calefacció (mensual) [kWh] | Energia a produir per la caldera de gas (mensual) [kWh] |
|----------|-----------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------|------------------------------------|---|
| Gener    | 429,3                             | 0                            | 429,3   | 46,5                          | 744                                | 790,5   |
| Febrer   | 387,8                             | 0                            | 387,8   | 42,0                          | 672                                | 714,0   |
| Març     | 429,3                             | 0                            | 429,3   | 46,5                          | 496                                | 542,5   |
| Abril    | 415,5                             | 0                            | 415,5   | 45,0                          | 480                                | 525,0   |
| Maig     | 429,3                             | 310                          | 739,3   | 46,5                          | 0                                  | 46,5  |
| Juny     | 415,5                             | 600                          | 1015,5  | 45,0                          | 0                                  | 45,0  |
| Juliol   | 429,3                             | 620                          | 1049,3  | 46,5                          | 0                                  | 46,5  |
| Agost    | 429,3                             | 465                          | 894,3   | 46,5                          | 0                                  | 46,5  |
| Setembre | 415,5                             | 0                            | 415,5   | 45,0                          | 480                                | 525,0   |
| Octubre  | 429,3                             | 0                            | 429,3   | 46,5                          | 496                                | 542,5   |
| Novembre | 415,5                             | 0                            | 415,5   | 45,0                          | 720                                | 765,0   |
| Desembre | 429,3                             | 0                            | 429,3   | 46,5                          | 744                                | 790,5   |
| TOTAL    | 5055,0                            | 1995                         | 7050,0  | 547,5                         | 4832                               | 5379,5  |

Taula 9.1. Distribució dels consums energètics mensual

A partir dels anteriors resultats s'obté que l'electricitat representa un 56,7% de l'energia consumida a la llar, mentre que la calefacció, la cuina de gas i l'aigua de consum sanitari representa el 43,3% restant.

Un cop feta la distribució d'energies, cal incorporar el rendiment de la caldera de gas a la instal·lació:



| Element                | Rendiment |       |
|------------------------|-----------|-------|
| Plaques fotovoltaïques | 30%       |       |
| Aerogenerador          | -         |       |
| Convertidor de tensió  | 95%       |       |
| Electrolitzador        | 85%       |       |
| Pila de combustible    | 45%       | 64,5% |
|                        | 19,36%    |       |
| Caldera de gas         | 85%       |       |
| Bescanviador de calor  | 98%       |       |
| Inversor               | 95%       |       |

Taula 9.2. Rendiments dels diferents elements de la instal·lació.

$$Energia a comprimir (elèctrica) = \frac{Consum\ elèctric\ anual}{\eta_{inversor} \cdot \eta_{elèctric\ de\ la\ PC} + \eta_{termic\ de\ la\ PC} \cdot \eta_{bescanviador}}$$

$$Energia a comprimir (elèctrica) = \frac{7050,0\ kWh}{0,95 \cdot 0,45 + 0,1936 \cdot 0,98} = 11422\ kWh$$

$$Energia a comprimir (caldera) = \frac{Consum\ caldera}{\eta_{caldera\ de\ gas}}$$

$$Energia a comprimir (caldera) = \frac{5379,5\ kWh}{0,85} = 6329\ kWh$$

Per tant, la quantitat d'hidrogen a comprimir serà per tant:

$$(11422 + 6329)\ kWh \cdot \frac{1\ Nm^3\ H_2}{3\ kWh} = 5917\ Nm^3\ H_2$$

A partir dels factors de compressibilitat de la taula 8.11:

$$Volum\ d'hidrogen = 5917\ Nm^3\ H_2 \cdot \frac{1,0059}{1\ MPa} \cdot \frac{0,1\ MPa}{1\ Nm^3} = 595,2\ \frac{m^3\ H_2}{any}$$

Abans de calcular els metres quadrats de plaques solars, cal obtenir el valor del rendiment global abans de l'emmagatzematge:



$$\eta_{\text{sense compressor}} = (\eta_{\text{aerogenerador}} + \eta_{\text{placa fotovoltaic}}) \cdot \eta_{\text{conv.}} \cdot \eta_{\text{electrolit.}} \cdot [0,386 \cdot \eta_{\text{caldera}} + 0,614 \cdot (\eta_{\text{elec. PC}} \cdot \eta_{\text{invers.}} + \eta_{\text{termic. PC}} \cdot \eta_{\text{heiscam}})]$$

Per al cas de la vivenda del Berguedà, amb un aerogenerador amb eficiència del 10%, el rendiment global abans de l'emmagatzematge és del 23,2%, mentre que per a la vivenda de Tarragona, amb un aerogenerador amb eficiència del 30%, és d'un 34,8%.

A partir de les característiques del compressor utilitzat, descrit a la taula 5.11, es calcula el consum del compressor:

$$\text{Consum compressor} = 608,7 \text{ m}^3 \cdot \frac{1 \text{ h}}{11,6 \text{ m}^3} \cdot 4 \text{ kW} = 209,9 \text{ kWh}$$

A partir d'aquest valor, es calculen els metres quadrats de plaques solars necessaris per a l'execució del projecte.

$$m^2 \text{ de plaques solars} = \frac{\frac{\text{Energia electrica} + \text{Energia calefaccio} + \text{Consum compressor}}{\eta_{\text{sense compressor}}} - E_{\text{eolica}}}{\text{Irradiacio total}}$$

Un cop obtinguts els metres quadrats de plaques solar que necessitarà la instal·lació, serà necessari determinar el rendiment global de la instal·lació, per tal de poder obtenir posteriorment els excedents mensuals d'energia:

$$\eta_{\text{GLOBAL}} = \frac{\text{Energia electrica} + \text{Energia calefaccio}}{\text{Energia solar} + \text{Energia eolica}}$$

A continuació es mostren els resultats que s'obtenen per a les mateixes situacions que s'han estudiat inicialment:

| Vivenda del Berguedà       |                  |                              |                          |                      |                                    |
|----------------------------|------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Diàmetre del aerogenerador | Rendiment global | Superfície de plaques solars | Excedent energètic [kWh] | Màxim excedent [kWh] | Volum d'hidrogen [m <sup>3</sup> ] |
| 4 m                        | 22,8%            | 40,2 m <sup>2</sup>          | 3184,4                   | 5159,1               | 8,08                               |





|                     |       |                     |        |        |      |
|---------------------|-------|---------------------|--------|--------|------|
| 3 m                 | 22,8% | 40,5 m <sup>2</sup> | 3208,0 | 5197,4 | 8,14 |
| 2 m                 | 22,8% | 40,8 m <sup>2</sup> | 3224,9 | 5224,8 | 8,19 |
| 1 m                 | 22,8% | 40,9 m <sup>2</sup> | 3235,0 | 5241,2 | 8,21 |
| Sense aerogenerador | 17,1% | 54,6 m <sup>2</sup> | 3238,4 | 5246,7 | 8,22 |

Taula 9.3. Resultats del dimensionat de la instal·lació de la vivenda del Berguedà

S'observa la disminució de superfície de panells solars quan s'instal·la l'aerogenerador, tot i que no és tan notable com en el cas de la vivenda de Tarragona com es veurà a continuació. Cal comentar també que la instal·lació de la caldera de gas permet augmentar el rendiment de forma considerable així com reduir també la superfície de plaques fotovoltaïques.

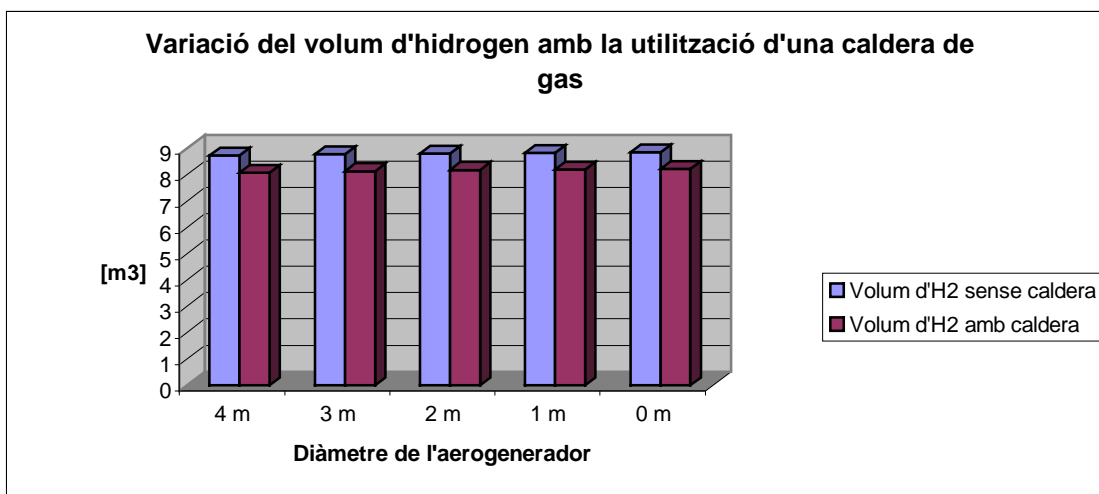


Fig. 9.1. Variació del volum del depòsit d'hidrogen en funció del diàmetre de l'aerogenerador amb i sense caldera de gas per a la vivenda del Berguedà



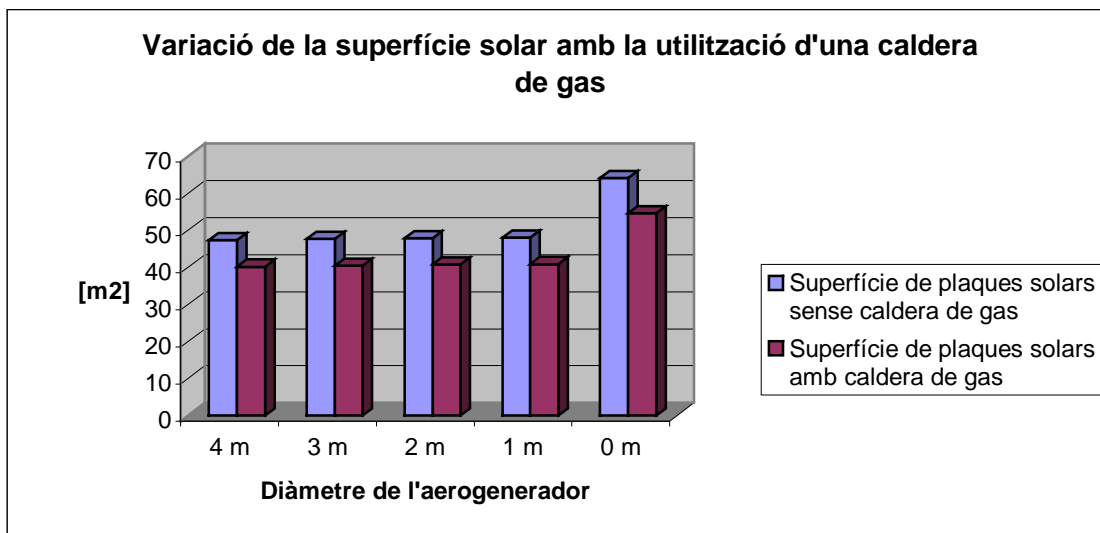


Fig. 9.2. Variació de la superfície solar en funció del diàmetre de l'aerogenerador amb i sense caldera de gas per a la vivenda del Berguedà

| Vivenda de Tarragona       |                  |                              |                          |                      |                                    |
|----------------------------|------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Diàmetre del aerogenerador | Rendiment global | Superfície de plaques solars | Excedent energètic [kWh] | Màxim excedent [kWh] | Volum d'hidrogen [m <sup>3</sup> ] |
| 4 m                        | 34,2%            | 14,3 m <sup>2</sup>          | 1916,1                   | 3104,4               | 4,86                               |
| 3 m                        | 34,2%            | 18,4 m <sup>2</sup>          | 2349,0                   | 3805,7               | 5,96                               |
| 2 m                        | 34,2%            | 21,26 m <sup>2</sup>         | 2658,1                   | 4306,6               | 6,75                               |
| 1 m                        | 34,2%            | 23,0 m <sup>2</sup>          | 2843,6                   | 4607,1               | 7,22                               |
| Sense aerogenerador        | 17,1%            | 47,1 m <sup>2</sup>          | 2905,5                   | 4707,3               | 7,37                               |

Taula 9.4. Resultats del dimensionat de la instal·lació de la vivenda de Tarragona



En aquest cas, es torna a comprovar que la incorporació de l'aerogenerador fa augmentar el rendiment de forma notable (més del doble), i a més, aconsegueix reduir a més de la meitat la superfície de plaques solars. En el cas de l'aerogenerador amb àleps de quatre metres de diàmetre s'aconsegueix reduir també a gairebé la meitat el dipòsit d'hidrogen.

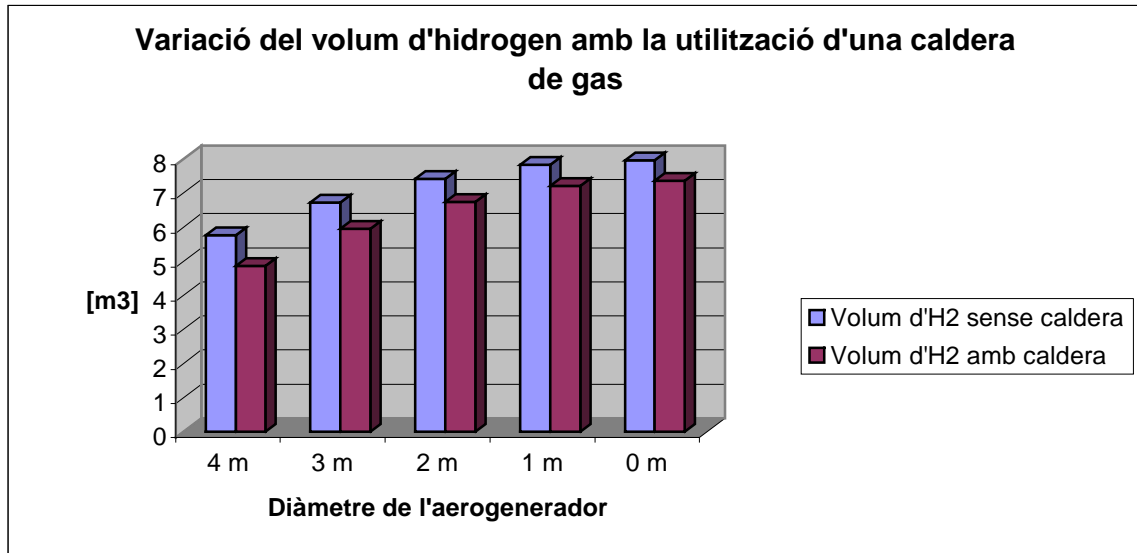


Fig. 9.3. Variació del volum del dipòsit d'hidrogen en funció del diàmetre de l'aerogenerador amb i sense caldera de gas per a la vivenda de Tarragona

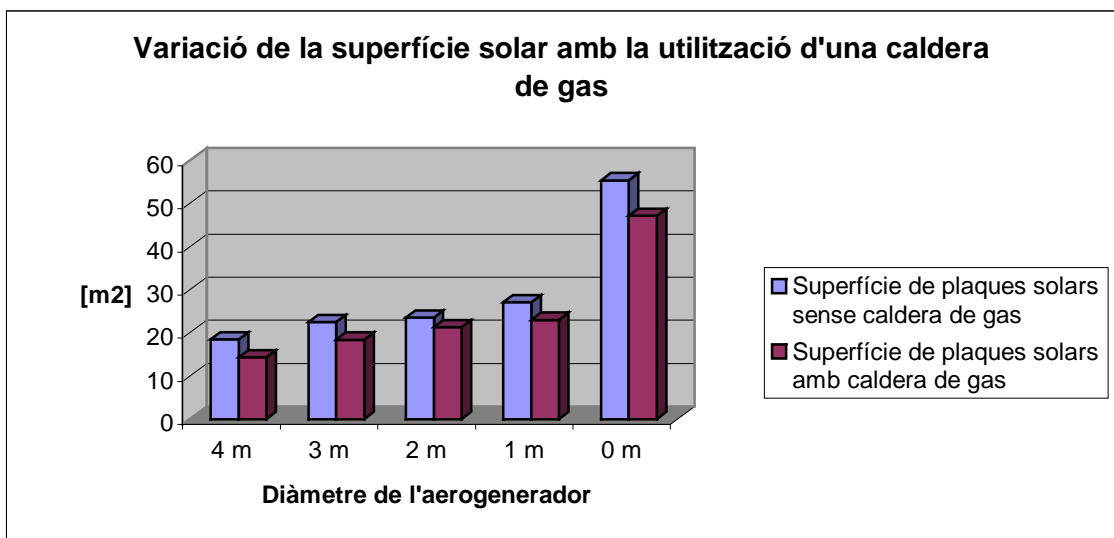


Fig. 9.4. Variació de la superfície solar en funció del diàmetre de l'aerogenerador amb i sense caldera de gas per a la vivenda del Berguedà



## 10. VIABILITAT ECONÒMICA

Un cop s'ha dimensionat la instal·lació, cal examinar la viabilitat econòmica d'aquesta. Per tal de fer-ho, caldrà saber el cost de la instal·lació en global, tenint en compte tots els seus components. Principalment, els elements que variaran el cost de la instal·lació final, seran l'aerogenerador, degut als diferents diàmetres pels que s'ha optat, les plaques solars i el volum dels dipòsits d'hidrogen.

| Elements                    | D=4 m  | D= 3m  | D=2m   | D=1m   | Sense aerogenerador |
|-----------------------------|--|--------|--------|--------|---------------------|
| Aerogenerador               | 5895 €   | 3795 € | 2650 € | 1570 € | 0 €                 |
| Plaques solars              | 800 €/m <sup>2</sup>                                       |        |        |        |                     |
| Convertidor                 | 7000 €   |        |        |        |                     |
| Electrolitzador             | 3000 €/kWp   |        |        |        |                     |
| Compressor                  | 18000 €  |        |        |        |                     |
| Dipòsit                     | 180 €/dipòsit (cada dipòsit té una capacitat de 50 litres) |        |        |        |                     |
| Regulador                   | 320 €  |        |        |        |                     |
| PEMFC                       | 25000 €  |        |        |        |                     |
| Intercanviador              | 460 €  |        |        |        |                     |
| Inversor                    | 1600 €   |        |        |        |                     |
| Sistema control             | 2000 €   |        |        |        |                     |
| Altres (instal·lació, etc.) | 2000 €   |        |        |        |                     |

Taula 10.1. Valoració econòmica dels diferents elements de la instal·lació.

A més d'aquestes dades, caldrà considerar les subvencions aplicades. Les subvencions es troben detallades a la web de l'ICAEN, però a grans trets, són els següents conceptes:

- ❑ Per a instal·lacions eòliques, es subvenciona fins a un 40% del cost d'aquesta (els conceptes d'aerogenerador, convertidor, inversor, sistema de control i altres en el nostre cas).
- ❑ Per a instal·lacions solars, es subvenciona fins a un 22% del cost de referència de la instal·lació, sent el cost de referència de 12 €/Wp en ser una instal·lació per a consum propi. La potència pic és calcula com s'indica continuació:



$$Potencia\ pic = 1000 \frac{W}{m^2} \cdot \eta_{placa\ solar} \cdot m^2\ de\ plaques\ solars$$

S'ha de comentar que l'estat de les subvencions no és l'adequat, ja que únicament es potencia la utilització de l'energia solar fotovoltaica, menyspreant la major part d'energies renovables. Per aquest motiu, com es podrà comprovar a continuació, s'obtenen majors subvencions per a les instal·lacions amb majors superfícies solars, sense ser gaire vàlid en el cas del projecte que s'està realitzant, on precisament, un dels compromisos consisteix en reduir la superfície solar a partir de la instal·lació d'un aerogenerador.

Per tant, tenint els anteriors conceptes en consideració, s'obtenen els següents resultats:

|                  | D=4 m         | D= 3m         | D=2m          | D=1m          | Sense aerogenerador |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|
| Plaques solars   | 37880         | 38152         | 38344         | 38464         | 51336               |
| Electrolitzador  | 42000         | 42000         | 42000         | 42000         | 57000               |
| Dipòsits         | 31428         | 31608         | 31752         | 31824         | 31860               |
| <b>Total</b>     | <b>173583</b> | <b>171935</b> | <b>171126</b> | <b>170238</b> | <b>196576</b>       |
| Potència pic     | 14205         | 14307         | 14379         | 14424         | 19251               |
| Cost referència  | 170460        | 171684        | 172548        | 173088        | 231012              |
| Subvenció solar  | 37501         | 37770         | 37961         | 38079         | 45000               |
| Subvenció eòlica | 7398          | 6558          | 6100          | 5668          | 0                   |
| <b>Inversió</b>  | <b>128684</b> | <b>127607</b> | <b>127065</b> | <b>126491</b> | <b>151576</b>       |

Taula 10.2. Inversió a realitzar a la vivenda del Berguedà en funció de les diverses alternatives

|                 | D=4 m         | D= 3m         | D=2m          | D=1m          | Sense aerogenerador |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|
| Plaques solars  | 14752         | 17992         | 20304         | 21696         | 44400               |
| Electrolitzador | 16500         | 20100         | 22800         | 24300         | 49800               |
| Dipòsits        | 20772         | 24228         | 26712         | 28188         | 28656               |
| <b>Total</b>    | <b>114299</b> | <b>122495</b> | <b>128846</b> | <b>132134</b> | <b>179236</b>       |



|                  |              |              |               |               |               |
|------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Potència pic     | 5532         | 6747         | 7614          | 8136          | 16650         |
| Cost referència  | 66384        | 80964        | 91368         | 97632         | 199800        |
| Subvenció solar  | 14604        | 17812        | 20101         | 21479         | 43956         |
| Subvenció eòlica | 7398         | 6558         | 6100          | 5668          | 0             |
| <b>Inversió</b>  | <b>92297</b> | <b>98125</b> | <b>102645</b> | <b>104987</b> | <b>135280</b> |

Taula 10.3. Inversió a realitzar a la vivenda de Tarragona en funció de les diverses alternatives

|                  | D=4 m           | D= 3m         | D=2m            | D=1m            | Sense aerogenerador |
|------------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| Plaques solars   | 32160           | 32400         | 32640           | 32720           | 43680               |
| Electrolitzador  | 36000           | 36000         | 36000           | 36000           | 48000               |
| Dipòsits         | 29592           | 29556         | 29484           | 29304           | 29088               |
| <b>Total</b>     | <b>161227</b>   | <b>159331</b> | <b>158354</b>   | <b>157174</b>   | <b>178348</b>       |
| Potència pic     | 12060           | 12150         | 12240           | 12270           | 16380               |
| Cost referència  | 144720          | 145800        | 146880          | 147240          | 196560              |
| Subvenció solar  | 31838,4         | 32076         | 32313,6         | 32392,8         | 43243,2             |
| Subvenció eòlica | 7398            | 6558          | 6100            | 5668            | 0                   |
| <b>Inversió</b>  | <b>121990,6</b> | <b>120697</b> | <b>119940,4</b> | <b>119113,2</b> | <b>135104,8</b>     |

Taula 10.4. Inversió a realitzar a la vivenda del Berguedà en funció de les diverses alternatives i amb caldera de gas a la instal·lació

|                 | D=4 m         | D= 3m         | D=2m          | D=1m          | Sense aerogenerador |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|
| Plaques solars  | 11440         | 14720         | 17008         | 18400         | 37680               |
| Electrolitzador | 12900         | 16500         | 19200         | 20700         | 42000               |
| Dipòsits        | 17496         | 21456         | 24300         | 25992         | 26532               |
| <b>Total</b>    | <b>105311</b> | <b>114051</b> | <b>120738</b> | <b>124242</b> | <b>163792</b>       |
| Potència pic    | 4290          | 5520          | 6378          | 6900          | 14130               |
| Cost referència | 51480         | 66240         | 76536         | 82800         | 169560              |



|                  |                |                |                 |               |                 |
|------------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Subvenció solar  | 11325,6        | 14572,8        | 16837,92        | 18216         | 37303,2         |
| Subvenció eòlica | 7398           | 6558           | 6100            | 5668          | 0               |
| Inversió         | <b>86587,4</b> | <b>92920,2</b> | <b>97800,08</b> | <b>100358</b> | <b>126488,8</b> |

Taula 10.5. Inversió a realitzar a la vivenda de Tarragona en funció de les diverses alternatives i amb caldera de gas a la instal·lació

S'observa clarament, com a la vivenda del Berguedà, surt més rentable la instal·lació amb un aerogenerador de vent de un metre de diàmetre i amb la utilització d'una caldera de gas; mentre que a la vivenda de Tarragona, degut a les condicions més favorables de vent, és més interessant, econòmicament parlant, instal·lar un aerogenerador de quatre metres de diàmetre.

A continuació, caldrà comprovar la viabilitat d'aquestes instal·lacions. Per fer-ho, cal saber que la facturació de l'energia elèctrica està constituïda per un concepte bàsic i altres complements. A més, la facturació bàsica es compon de dos termes, el terme de potència (tp) i el terme d'energia (te). Actualment, els valors d'aquests dos termes són:

$$\begin{aligned} tp &= 1,494345 \text{ €/kW}\cdot\text{mes} \\ te &= 0,087479 \text{ €/kWh} \end{aligned}$$

A partir d'aquest valor, es calcula el concepte de facturació que haurien de pagar els usuaris de la vivenda a les empreses de distribució d'energia elèctrica.

$$Facturacio = 5kW \cdot 1,494345 \frac{\text{€}}{\text{kW}\cdot\text{mes}} \cdot 12 \text{ mesos} + 12.528,9 \frac{\text{kWh}}{\text{any}} \cdot 0,087479 = 1185,68 \frac{\text{€}}{\text{any}} \simeq 1200 \frac{\text{€}}{\text{any}}$$

Per tant el valor anual de l'energia produïda és aproximadament de 1200 €

A continuació es realitzaran els estudis de viabilitat per a cadascuna de les millors solucions obtingudes als diferents estudis realitzats. Es presenta a través d'una taula un s'observa el flux de caixa i el període de retorn de la inversió.



A la següent taula s'indica l'evolució del flux de caixa per a la inversió de la vivenda del Berguedà. S'ha fet l'estudi per al cas més favorable (econòmicament parlant) de la vivenda del Berguedà, és a dir, amb un aerogenerador amb àleps d'un metre de diàmetre i 48 m<sup>2</sup> de plaques solars. L'ingrés correspon al valor anual de l'energia produïda amb un 10% d'increment anual; el manteniment correspon a un 0,5% del cost de la inversió inicial. A partir d'aquest conceptes, s'observa com el període de retorn és superior als 25 anys de vida útil de la instal·lació, fet que implica la no viabilitat econòmica d'aquesta instal·lació.

| Any                     | Inversió inicial | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10         | 11         | 12         |
|-------------------------|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Ingrés                  | -                | 1200,00    | 1320,00    | 1452,00    | 1597,20    | 1756,92    | 1932,61    | 2125,87    | 2338,46    | 2572,31    | 2829,54    | 3112,49    | 3423,74    |
| Manteniment (0,5% inv.) | -                | -632,45    | -695,70    | -758,94    | -822,19    | -885,43    | -948,68    | -1011,93   | -1075,17   | -1138,42   | -1201,66   | -1264,91   | -1328,15   |
| Inversió                | -126491          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| Cash-flow               | -126491          | 567,55     | 624,30     | 693,06     | 775,01     | 871,49     | 983,93     | 1113,95    | 1263,29    | 1433,89    | 1627,88    | 1847,58    | 2095,59    |
| Pay-back                | -126491          | -125923,09 | -125298,79 | -124605,74 | -123830,72 | -122959,24 | -121975,31 | -120861,36 | -119598,07 | -118164,18 | -116536,30 | -114688,72 | -112593,13 |
| Any                     | 13               | 14         | 15         | 16         | 17         | 18         | 19         | 20         | 21         | 22         | 23         | 24         | 25         |
| Ingrés                  | 3766,11          | 4142,73    | 4557,00    | 5012,70    | 5513,97    | 6065,36    | 6671,90    | 7339,09    | 8073,00    | 8880,30    | 9768,33    | 10745,16   | 11819,68   |
| Manteniment (0,5% inv.) | -1391,40         | -1454,64   | -1517,89   | -1581,13   | -1644,38   | -1707,62   | -1770,87   | -1834,11   | -1897,36   | -1960,60   | -2023,85   | -2087,10   | -2150,34   |
| Inversió                | -                | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| Cash-flow               | 2374,72          | 2688,08    | 3039,11    | 3431,56    | 3869,59    | 4357,74    | 4901,03    | 5504,98    | 6175,64    | 6919,70    | 7744,48    | 8658,07    | 9669,34    |
| Pay-back                | -110218,41       | -107530,33 | -104491,22 | -101059,65 | -97190,06  | -92832,32  | -87931,29  | -82426,32  | -76250,68  | -69330,98  | -61586,50  | -52928,43  | -43259,09  |

Taula 10.6. Flux de caixa i període de retorn de la inversió per a la vivenda del Berguedà en el seu cas més favorable (Aerogenerador amb D=1m)





A la següent taula s'indica l'evolució del flux de caixa per a la inversió de la vivenda de Tarragona. S'ha fet l'estudi per al cas més favorable (econòmicament parlant), amb un aerogenerador amb àleps de quatre metres de diàmetre i 18 m<sup>2</sup> de plaques solars. S'observa en aquest cas que la inversió realitzada és rentable, ja que l'últim any de vida útil de la instal·lació, ja s'obtenen beneficis.

| Any                     | Inversió inicial | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        | 11        | 12        |
|-------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ingrés                  | -                | 1200,00   | 1320,00   | 1452,00   | 1597,20   | 1756,92   | 1932,61   | 2125,87   | 2338,46   | 2572,31   | 2829,54   | 3112,49   | 3423,74   |
| Manteniment (0,5% inv.) | -                | -461,48   | -507,63   | -553,78   | -599,93   | -646,08   | -692,22   | -738,37   | -784,52   | -830,67   | -876,82   | -922,97   | -969,11   |
| Inversió                | -92297           | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
| Cash-flow               | -92297           | 738,52    | 812,37    | 898,22    | 997,27    | 1110,84   | 1240,39   | 1387,50   | 1553,94   | 1741,64   | 1952,72   | 2189,53   | 2454,63   |
| Pay-back                | -92297           | -91558,00 | -90745,63 | -89847,41 | -88850,14 | -87739,30 | -86498,91 | -85111,41 | -83557,47 | -81815,83 | -79863,11 | -77673,58 | -75218,96 |
| Any                     | 13               | 14        | 15        | 16        | 17        | 18        | 19        | 20        | 21        | 22        | 23        | 24        | 25        |
| Ingrés                  | 3766,11          | 4142,73   | 4557,00   | 5012,70   | 5513,97   | 6065,36   | 6671,90   | 7339,09   | 8073,00   | 8880,30   | 9768,33   | 10745,16  | 11819,68  |
| Manteniment (0,5% inv.) | -1015,26         | -1061,41  | -1107,56  | -1153,71  | -1199,85  | -1246,00  | -1292,15  | -1338,30  | -1384,45  | -1430,60  | -1476,74  | -1522,89  | -1569,04  |
| Inversió                | -                | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
| Cash-flow               | 2750,85          | 3081,32   | 3449,44   | 3858,99   | 4314,11   | 4819,36   | 5379,75   | 6000,79   | 6688,55   | 7449,70   | 8291,59   | 9222,27   | 10250,64  |
| Pay-back                | -72468,10        | -69386,79 | -65937,35 | -62078,36 | -57764,24 | -52944,88 | -47565,13 | -41564,34 | -34875,79 | -27426,09 | -19134,50 | -9912,23  | 338,41    |

Taula 10.7. Flux de caixa i període de retorn de la inversió per a la vivenda de Tarragona en el seu cas més favorable (Aerogenerador amb D = 4 m)



A la següent taula s'indica l'evolució del flux de caixa per a la inversió a la vivenda del Berguedà, utilitzant una caldera de gas. S'ha fet l'estudi per al cas més favorable (econòmicament parlant), amb un aerogenerador amb àleps d'un metre de diàmetre i 40,9 m<sup>2</sup> de plaques solars. S'observa en aquest cas que la inversió realitzada tampoc és rentable, ja que l'últim any de vida útil de la instal·lació, encara no s'obtenen beneficis.

| Any                     | Inversió inicial | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10         | 11         | 12         |
|-------------------------|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Ingrés                  | -                | 1200,00    | 1320,00    | 1452,00    | 1597,20    | 1756,92    | 1932,61    | 2125,87    | 2338,46    | 2572,31    | 2829,54    | 3112,49    | 3423,74    |
| Manteniment (0,5% inv.) | -                | -595,57    | -655,12    | -714,68    | -774,24    | -833,79    | -893,35    | -952,91    | -1012,46   | -1072,02   | -1131,58   | -1191,13   | -1250,69   |
| Inversió                | -119113          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| Cash-flow               | -119113          | 604,43     | 664,88     | 737,32     | 822,96     | 923,13     | 1039,26    | 1172,97    | 1326,00    | 1500,29    | 1697,96    | 1921,36    | 2173,05    |
| Pay-back                | -119113          | -118508,77 | -117843,89 | -117106,57 | -116283,60 | -115360,48 | -114321,21 | -113148,25 | -111822,25 | -110321,96 | -108624,00 | -106702,64 | -104529,59 |
| Any                     | 13               | 14         | 15         | 16         | 17         | 18         | 19         | 20         | 21         | 22         | 23         | 24         | 25         |
| Ingrés                  | 3766,11          | 4142,73    | 4557,00    | 5012,70    | 5513,97    | 6065,36    | 6671,90    | 7339,09    | 8073,00    | 8880,30    | 9768,33    | 10745,16   | 11819,68   |
| Manteniment (0,5% inv.) | -1310,25         | -1369,80   | -1429,36   | -1488,92   | -1548,47   | -1608,03   | -1667,58   | -1727,14   | -1786,70   | -1846,25   | -1905,81   | -1965,37   | -2024,92   |
| Inversió                | -                | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| Cash-flow               | 2455,87          | 2772,92    | 3127,64    | 3523,78    | 3965,50    | 4457,34    | 5004,32    | 5611,95    | 6286,30    | 7034,05    | 7862,52    | 8779,80    | 9794,75    |
| Pay-back                | -102073,72       | -99300,79  | -96173,15  | -92649,37  | -88683,88  | -84226,54  | -79222,22  | -73610,27  | -67323,97  | -60289,93  | -52427,41  | -43647,61  | -33852,86  |

Taula 10.8. Flux de caixa i període de retorn de la inversió per a la vivenda del Berguedà en el seu cas més favorable (Aerogenerador amb D = 1 m)



A la següent taula s'indica l'evolució del flux de caixa per a la inversió de la vivenda de Tarragona utilitzant una caldera de gas. S'ha fet l'estudi per al cas més favorable (econòmicament parlant), amb un aerogenerador amb àleps de quatre metres de diàmetre i 14,3 m<sup>2</sup> de plaques solars. S'observa en aquest cas que la inversió realitzada és rentable, ja que el darrer any de vida útil de la instal·lació, ja s'obtenen beneficis.

| Any                     | Inversió inicial | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        | 11        | 12        |
|-------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ingrés                  | -                | 1200,00   | 1320,00   | 1452,00   | 1597,20   | 1756,92   | 1932,61   | 2125,87   | 2338,46   | 2572,31   | 2829,54   | 3112,49   | 3423,74   |
| Manteniment (0,5% inv.) | -                | -432,94   | -476,23   | -519,52   | -562,82   | -606,11   | -649,41   | -692,70   | -735,99   | -779,29   | -822,58   | -865,87   | -909,17   |
| Inversió                | -86587           | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
| Cash-flow               | -86587           | 767,06    | 843,77    | 932,48    | 1034,38   | 1150,81   | 1283,21   | 1433,17   | 1602,47   | 1793,02   | 2006,96   | 2246,62   | 2514,57   |
| Pay-back                | -86587           | -85820,34 | -84976,57 | -84044,09 | -83009,71 | -81858,90 | -80575,70 | -79142,52 | -77540,05 | -75747,03 | -73740,08 | -71493,46 | -68978,89 |
| Any                     | 13               | 14        | 15        | 16        | 17        | 18        | 19        | 20        | 21        | 22        | 23        | 24        | 25        |
| Ingrés                  | 3766,11          | 4142,73   | 4557,00   | 5012,70   | 5513,97   | 6065,36   | 6671,90   | 7339,09   | 8073,00   | 8880,30   | 9768,33   | 10745,16  | 11819,68  |
| Manteniment (0,5% inv.) | -952,46          | -995,76   | -1039,05  | -1082,34  | -1125,64  | -1168,93  | -1212,22  | -1255,52  | -1298,81  | -1342,10  | -1385,40  | -1428,69  | -1471,99  |
| Inversió                | -                | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
| Cash-flow               | 2813,65          | 3146,97   | 3517,95   | 3930,36   | 4388,33   | 4896,43   | 5459,68   | 6083,57   | 6774,19   | 7538,20   | 8382,93   | 9316,47   | 10347,69  |
| Pay-back                | -66165,24        | -63018,26 | -59500,32 | -55569,96 | -51181,63 | -46285,19 | -40825,52 | -34741,94 | -27967,75 | -20429,56 | -12046,63 | -2730,16  | 7617,54   |

Taula 10.9 Flux de caixa i període de retorn de la inversió per a la vivenda de Tarragona en el seu cas més favorable (Aerogenerador amb D = 4 m)



La instal·lació és inviable econòmicament per a la vivenda del Berguedà, ja que durant el cicle de vida de les plaques fotovoltaïques, no es produeix retorn de la inversió. En canvi, a la vivenda de Tarragona, la instal·lació és rentable en els dos casos considerats, amb i sense la utilització de caldera de gas, ja que els darrers anys de vida de la instal·lació, ja s'obtenen beneficis.

Cal remarcar el fet de que les subvencions concedides per la Generalitat de Catalunya no ajuden gaire a aquests tipus de instal·lacions, ja que únicament fan referència a instal·lacions solars i de biocombustibles. La subvenció per a l'energia eòlica és per part del Estat Espanyol. Tot i això, combinant les dues, el preu de la instal·lació és massa car, i inviable econòmicament encara. Si s'aconseguís reduir el cost dels diferents components de la instal·lació, principalment el de l'electrolitzador, la pila de combustible i depòsits, i les subvencions fossin més eficaces, el cost global de la instal·lació seria més adequat.



## 11. ESTUDI D'IMPACTE AMBIENTAL

Per tal de fer l'estudi d'impacte ambiental, caldrà examinar la quantitat de CO<sub>2</sub> que es deixarà d'emetre anualment a les vivendes seleccionades amb la instal·lació proporcionada, comparant-ho amb una instal·lació basada en la connexió a la xarxa elèctrica.

Per fer-ho, és necessari conèixer la composició de l'energia elèctrica produïda a l'estat espanyol. El consum d'energia a Espanya és el que es detalla a continuació:

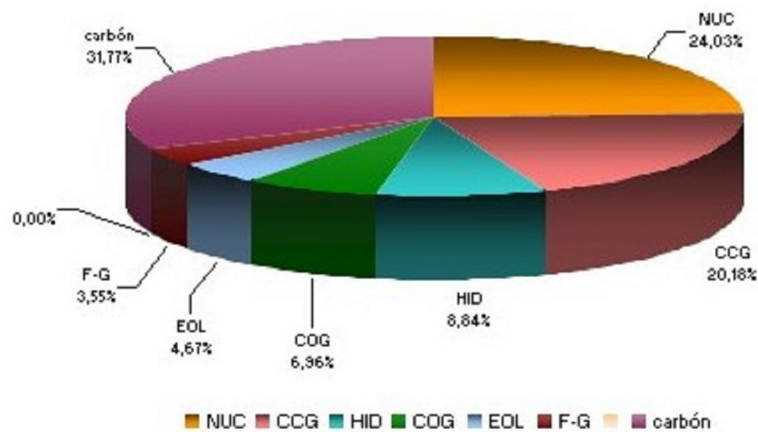


Fig. 11.1. Producció d'energia elèctrica per tecnologies a l'Estat espanyol (any 2005) (Font: Red Eléctrica Española)

A partir d'aquestes dades, és considera que les úniques fonts generadores de CO<sub>2</sub> són el gas natural, el petroli i el carbó. Sabent que l'energia a produir en cadascuna de les dues vivendes és de 12528,9 kWh, i a partir dels percentatges de cadascuna de les tres fonts, es pot calcular el valor de la massa de CO<sub>2</sub> que es deixen d'emetre a l'atmosfera.

Suposem que les centrals de cicle combinat i de cogeneració (27,04% de la producció d'electricitat total) treballen amb metà pur (CH<sub>4</sub>). Llavors, les emissions de CO<sub>2</sub> causades per la instal·lació de gas natural seran:

$$\frac{12528,9 \text{ kWh} \cdot \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}}}{36000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}} \cdot 27,04\% = 338,8 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4$$



On  $36000 \text{kJ/m}^3$  és el Poder Calorífic Inferior (PCI) del metà. Un cop obtinguts els metres cúbics de metà necessaris, i tenint en compte que el rendiment d'una central de cycle combinat que utilitzi gas natural sol ser semblant al 50%, s'extreu el valor de massa de  $\text{CO}_2$ :

$$\frac{338,8 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4}{0,5} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{ CO}_2}{1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4} \cdot \frac{44 \text{ kg CO}_2}{22,4 \text{ m}^3 \text{ CO}_2} = 1331 \text{ kg CO}_2$$

El mateix procediment per al fuel, i coneixent que la seva contribució a la xarxa elèctrica és del 3,53%, el PCI és de  $41900 \text{ kJ/kg}$  i que el rendiment d'una central tèrmica funcionant amb fuel-oil és aproximadament del 30%, s'obté el següent resultat:

$$\frac{12528,9 \text{ kWh} \cdot \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}}}{41900 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}} \cdot 3,53\% = 38 \text{ kg de C}$$

$$\frac{38 \text{ kg C}}{0,3} \cdot \frac{44 \text{ kg CO}_2}{12 \text{ kg C}} = 464,4 \text{ kg CO}_2$$

Finalment, per al carbó, sabent que la major part del carbó consumit a Espanya és antracita, amb un PCI de  $29300 \text{ kJ/kg}$ , i que les centrals tèrmiques que utilitzen carbó com a font de combustible també tenen un rendiment al voltant del 30% i suposen un 31,64% de la contribució a la generació d'electricitat, s'obté el següent resultat:

$$\frac{12528,9 \text{ kWh} \cdot \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kWh}}}{29300 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}} \cdot 31,64\% = 487 \text{ kg de C}$$

$$\frac{487 \text{ kg C}}{0,3} \cdot \frac{44 \text{ kg CO}_2}{12 \text{ kg C}} = 5953 \text{ kg CO}_2$$



Per tant, la emissió total de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera és de:

$$\text{Emissions de CO}_2 = 1331 \text{ kg CO}_2 + 464,4 \text{ kg CO}_2 + 5953 \text{ kg CO}_2 \approx 7750 \text{ kg CO}_2$$

Es a dir, que la instal·lació proposada, comportaria evitar la emissió de 7750 kg de diòxid de carboni que suposaria el consum d'energia a través de l'energia elèctrica proporcionada a la xarxa elèctrica espanyola.

Tal i com es mostra a la següent figura, el preu de les emissions de CO<sub>2</sub> ha disminuït considerablement durant el darrer any. Actualment, (a data del mes de juliol), el preu de les emissions de CO<sub>2</sub> està al voltant dels 10 cèntims d'euro per tona de CO<sub>2</sub>. Això implica que si es venguessin les reduccions d'emissions de les dues vivendes, el benefici seria de 0,775 € anuals.



Fig. 11.2. Evolució del preu de les emissions de CO<sub>2</sub> (Font: [www.sendeco2.com](http://www.sendeco2.com))

Amb tot el que s'ha comentat anteriorment, es podria concloure que la instal·lació no té cap efecte sobre el medi, ja que no emet per si mateixa gasos contaminants, però la fabricació dels diferents elements que la componen (piles de combustible, plaques fotovoltaïques, aerogenerador, compressor, etc.) pot provocar més emissions de les que s'aconsegueixen eliminar durant la vida útil de la instal·lació. El tema de la reducció d'emissions és complex, ja que si es tenen en compte les emissions produïdes durant el període de fabricació dels diferents elements, llavors l'impacte ambiental de la instal·lació ja no és nul com semblava inicialment.

L'impacte visual de la instal·lació a l'entorn és mínim, ja que gran part de la instal·lació es troba a l'interior de l'habitatge. Els únics elements que estan a l'exterior són les plaques fotovoltaïques i l'aerogenerador. En quant a les plaques fotovoltaïques, la integració arquitectònica d'aquestes a la vivenda és molt bona. La ubicació dels panells sol ser a les teulades dels habitatges, per tant l'impacte visual d'aquests elements és gairebé nul.

En quant a l'aerogenerador, l'efecte que produeixen al medi que l'envolta és major. Existeix un problema conegut amb les aus migratòries, tot i que afortunadament, els nivells de mortalitat de les aus són molt baixos en comparació amb altres causes, com pot ser l'atropellament. A més, com que els aerogeneradors actuals tenen una velocitat de rotació reduïda, el problema de xoc amb els àleps s'està



reduint. Un altre problema que presenten és l'impacte paisatgístic, degut a l'aparició de l'element vertical i els àleps. A més, quan apareix el sol per darrera dels aerogeneradors i les ombres dels àleps es projecten amb regularitat sobre la superfície, ho fan de forma intermitent, de forma que juntament amb el soroll produït pel gir, pot comportar importants problemes d'estrès, amb importants efectes a la salut. Malgrat això, la millora del disseny dels aerogeneradors, ha permès reduir el soroll que produeixen.





## Conclusions

La situació mundial ens evoca cada cop més cap a una massiva utilització de l'energia per poder sobreviure. Aquest fet comporta la irrupció al mercat energètic de noves tecnologies innovadores que permetin trobar un camí paral·lel al dels combustibles fòssils. Un camí sense emissions contaminants, en el qual la tecnologia de l'hidrogen hi tindrà molt a dir en un futur no gaire llunyà.

Amb la realització d'aquest estudi s'ha pogut posar de manifest la possibilitat d'utilitzar fonts energètiques renovables combinades amb la tecnologia de l'hidrogen per tal de poder electrificar vivendes rurals. L'estat de l'art actual de la tecnologia dels aerogeneradors es troba actualment al seu grau de màxim desenvolupament; la tecnologia fotovoltaica es troba ara en una fase de maduració, és a dir, que encara hi poden haver canvis que puguin millorar encara més les eficiències d'aquests sistemes; i en quant a la tecnologia de l'hidrogen, encara es troba en fase de desenvolupament, fet que fa que el preu de les instal·lacions que utilitzin sistemes amb hidrogen siguin prou elevats.

Aquests fets fan que aquells dissenys que pretenguin la combinació de les tres tecnologies no siguin rentables econòmicament encara. Tot i això cal comentar que encara de que aquestes instal·lacions no siguin rentables econòmicament, si que ho són energèticament.

L'hidrogen ha de convertir-se en una font intermèdia per tal d'emmagatzemar l'energia elèctrica ja que actualment no existeix cap sistema realment eficaç per realitzar això. És en aquest camp on s'han de potenciar les investigacions, en aquells components del sistema que tinguin relació amb la compressió, emmagatzematge d'hidrogen i la seva posterior conversió en fluid elèctric.

Actualment, el cost d'aquests sistemes no permeten la viabilitat d'aquests tipus d'instal·lacions. La tecnologia de l'hidrogen es troba encara en una fase molt inicial de desenvolupament, que no permet garantir uns preus competitius al mercat actual. Aquest fet fa que mentre el cost d'aquests sistemes sigui tan elevat i encara es disposin recursos fòssils, les tendències energètiques continuaran decantant-se per l'ús d'aquests darrers.

La instal·lació proposada al projecte pretenia utilitzar l'hidrogen per tal d'emmagatzemar l'energia produïda per l'aerogenerador i el sistema fotovoltaic. A partir de les dues vivendes analitzades, s'ha pogut comprovar com les diferents condicions dels dos emplaçaments, fa que la solució òptima no sigui única. Al cas de la instal·lació del Berguedà, degut a la menor qualitat de l'energia eòlica a aprofitar, la solució més rentable era amb un aerogenerador d'un metre d'àleps de diàmetre, mentre que per a la vivenda de Tarragona, la millor solució era amb un aerogenerador d'àleps de quatre metres de diàmetre. Aprofitar les condicions eòliques de cadascuna de les zones ha pogut reduir considerablement la superfície solar (a la instal·lació del Berguedà, la reducció de la superfície solar és d'un 30%, mentre que a la vivenda de Tarragona, aquest valor arriba al 300%, passant de 55 m<sup>2</sup> a 18 m<sup>2</sup>).

Aquesta reducció de la superfície solar, permet observar com la combinació de diferents energies renovables, permet obtenir resultats adients. Cal a dir que per tal de poder realitzar



aquests sistemes híbrids, les condicions de l'entorn han de ser les adequades i que permetin la instal·lació i utilització de les diferents energies renovables.

El fet de reduir la superfície de la instal·lació solar havia de permetre reduir considerablement el cost total de la instal·lació. Aquest fet però, no es produeix d'una manera prou significativa. Les subvencions que aporten els estats o comunitats per a aquests tipus d'instal·lacions, no són les adients. Com s'ha pogut comprovar, la realitat econòmica de les subvencions que realitzen les administracions va en funció de la superfície solar instal·lada, és a dir, a major superfície solar, major subvenció econòmica. Per aquest fet, aquest projecte, que pretenia reduir la superfície solar a través dels aerogeneradors trobant una solució òptima, fa que en funció dels casos, després d'obtenir les subvencions de les administracions, sigui més rentable aquella amb més superfície solar, sense tenir en compte la funció de l'energia eòlica. Aquest fet es deu principalment a que les administracions, tant catalana com espanyola, han optat per centrar els esforços econòmics en les energies solars, sense tenir en compte el volum o la complexitat de la instal·lació.

La realització d'aquest projecte ha servit per demostrar que la tecnologia del hidrogen pot formar part del dia a dia en un temps prou reduït, ja que en breu, aquests tipus d'instal·lacions seran viables econòmicament d'una manera més clara. No obstant això, és evident que la recerca i la investigació han de seguir la direcció de l'hidrogen, per permetre una reducció global de costos, que faci que finalment l'hidrogen arribi a ser el vector energètic net del futur.



## Agraïments

Agrair l'ajut i consells mostrats en tot moment pel Director del Projecte Jordi Llorca, que a permès l'orientació de l'estudi en el que finalment ha sigut, així com a tots els professors de l'Escola que han fet possible la realització d'aquest projecte de fi de carrera amb les seves aportacions durant les diferents assignatures realitzades per l'alumne durant aquests darrers cinc anys.

Agrair també la possibilitat donada de poder realitzar aquesta carrera a la meva família, la seva comprensió i dedicació en tot moment.



## Bibliografia

- [1] LL.. BATET, *Análisis de las perspectivas energéticas mundiales para el próximo cuarto de siglo*, Departamento de Física e Ingeniería Nuclear, Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.
- [2] BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, [<http://www.bp.com/home.do?categoryId=1>, 3 de març de 2007].
- [3] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, [<http://www.iea.org/>, 3 de març de 2007].
- [4] EUROSTAT. ENVIRONMENT AND ENERGY, [[http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page?\\_pageid=0,1136239,0\\_45571444&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page?_pageid=0,1136239,0_45571444&_dad=portal&_schema=PORTAL), 3 de març de 2007].
- [5] LE BAROMÈTRE EUROPÉEN DES ÉNERGIES RENOUVELABLES, [<http://www.energies-renouvelables.org/>, 3 de març de 2007].
- [6] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, [[http://www.wmo.ch/pages/index\\_en.html](http://www.wmo.ch/pages/index_en.html), 10 de març de 2007].
- [7] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, [<http://www.unep.org/>, 3 de març de 2007].
- [8] O. BOIX, L.SAINZ, F.CÓRCOLES, F.J. SUELVES, J.J. MESAS *Tecnología eléctrica*, Barcelona: Ediciones CEYSA, 2004.
- [9] RED ELÉCTRICA ESPAÑOLA, [<http://www.ree.es/apps/home.asp>, 9 de juny de 2007].
- [10] J. A. BOTAS, J. A. CALLES, J. DUFOUR, G. SAN MIGUEL, *La economía del hidrógeno – una visión global - Sobre la revolución energética del siglo XXI*, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, Móstoles, 2004.
- [11] HYDROGEN POWERED WORLD, [<http://www.hydrogen.co.uk/>, 10 de març de 2007].
- [12] HYDROGENICS CORPORATION, [<http://www.stuartenergy.com/power/products.asp>, 10 de març de 2007].
- [13] E-SOURCES, [<http://www.e-sources.com/hydrogen-storage.htm>, 17 de març de 2007].
- [14] THE FUEL CELL WAY, [[http://www.fcway.com/index\\_es.htm](http://www.fcway.com/index_es.htm), 24 de febrer de 2007].
- [15] PLATAFORMA TECNOLÓGICA ESPAÑOLA DEL HIDRÓGENO Y DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE, [<http://www.ptehpc.org/>, 13 febrer de 2007]



- [16] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DEL HIDRÓGENO, [[www.aeh2.org](http://www.aeh2.org), 13 de febrer de 2007]
- [17] DR. ARNALDO VISINTIN, Conversión y almacenamiento de energía en base a hidrógeno. Estrategias en el mercosur, La Plata, Argentina, 2005.
- [18] X. PONS, "Estimación de la Radiación Solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica", 2007.
- [19] M. NINYEROLA, X. PONS, J.M. ROURE, Atlas climàtic digital, UAB, 24 de març de 2007.
- [20] INSTITUT CATALÀ DE L'ENERGIA. Atlas de Radiació Solar de Catalunya. Barcelona, 2007.
- [21] DEPARTAMENT DE TREBALL I INDÚSTRIA DE LA GENERALITAT DE CATALUNYA, Pla de l'energia de Catalunya 2006-2015.
- [22] DEPARTAMENT DE MEDI AMBIENT I HABITATGE DE LA GENERALITAT DE CATALUNYA, La contribució de l'habitatge de Catalunya a la reducció d'emissions de gasos efecte hivernacle, Barcelona, Novembre 2005.
- [23] FRAUNHOFER ISE, [<http://www.ise.fhg.de/isesite/areas-of-business-and-market-areas/solar-cells/iii-v-solar-cells-and-epitaxy/concentrator>, 24 de març de 2007].
- [24] CONCENTRIX SOLAR, [<http://www.concentrixsolar.de/cms/espanol-technologieaflatcon.html>, Tecnologia Flatcon, 24 de març de 2007].
- [25] RENEWABLES MADE IN GERMANY, [<http://www.renewables-made-in-germany.com/es/fotovoltaica/>, 24 de març de 2007].
- [26] SCHOTT SOLAR, [[http://www.schott.com/photovoltaic/spanish/about\\_pv/basics.html#1](http://www.schott.com/photovoltaic/spanish/about_pv/basics.html#1), 24 de març de 2007].
- [27] J. MIRALLES, R. MASSANÉS, PERSPECTIVA AMBIENTAL. ENERGIA FOTOVOLTAICA. 1999.
- [28] ARQUITECTURA I ENERGIES RENOVABLES, [<http://www.coac.net/mediambient/renovables/default.html>, 20 de març de 2007].
- [29] REBELIÓN. ECOLOGÍA SOCIAL, [<http://www.rebelion.org/noticia.php?id=13329>, notícia relacionada amb la patent alemanya dels concentradors solars, 24 de març de 2007]
- [30] DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION, [[www.windpower.org](http://www.windpower.org), 27 de febrer de 2007].
- [31] SUN POWER, [<http://www.sunpowercorp.com/>, informació sobre plaques fotovoltaiques i inversors (preus i condicions tècniques), 25 de març de 2007]
- [32] JBORNAY AEROGENERADORES, [<http://www.bornay.com/es/productos.html>, productes relacionats amb la instal·lació realitzada, 9 de juny de 2007].



[33] ACCAGEN ELECTROLYZERS, [<http://www.accagen.com/age-family.htm>], informació sobre electrolitzadors (preus i condicions tècniques), 9 de juny de 2007].

[34] BALLARD, [<http://www.ballard.com/>], informació sobre piles de combustible (preus i condicions tècniques), 9 de juny de 2007].

[35] SISTEMA ELECTRÓNICO DE NEGOCIACIÓN DE DERECHOS DE EMISIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO, [[www.sendeco2.com](http://www.sendeco2.com)], 7 de julio de 2007].

