

La transició energètica a Catalunya

Estudi general
Associació / Col·legi d'Enginyers
Industrials de Catalunya



Equip de redacció

Lluís Pinós Jorba
Juan Puertas Agudo

Vicepresident Comissió d'Energia
Vicepresident Comissió d'Energia

Equip de supervisió

Jeroni Farnós Marsal
Josep Maria Montagut Freixas
Lluís A. Puerto Giménez
Marc Oliva Carbonell

President Comissió d'Indústria Química
President Comissió d'Energia
President Comissió de Mobilitat
President Comissió Canvi Climàtic i Economia Circular

Agraïments

José Antonio Borque Galindo
Joaquim Brun Andreu
Xavier Flotats Ripoll
José Maria Garcia Casanovas
Antoni Tahull Palacín
Xavier Vallvé Miquel

Technip Energies
Comissió d'Energia
Professor emèrit de la UPC
President Consell de Referència Comissió d'Energia
Comissió d'Energia
Comissió d'Energia

ÍNDEX

1 Resum executiu.....	5
2 Introducció.....	7
3 Situació actual a Catalunya.....	8
4 Projecció de la demanda d'energia final a 2050	10
5 Necessitats d'energia primària a Catalunya a 2050.....	13
6 Possibles solucions per cobrir la demanda.....	15
6.1 Determinació de la capacitat màxima d'energies renovables que permet el territori	15
6.2 Hipòtesis per determinar el potencial tècnic de generació d'energia elèctrica	15
6.3 Escenari creixent: necessitats de potència elèctrica autoproduint tot l'hidrogen	19
6.4 Necessitats de potència elèctrica important part de l'hidrogen	20
6.5 Comparativa de resultats	23
6.6 L'hidrogen com a solució a la demanda tèrmica	24
6.7 Importació d'hidrogen	25
6.8 Biometà	27
7 Implantació del Pla - primer objectiu 2030	28
8 Aspectes econòmics i laborals.....	30
9 Comparativa de l'estudi amb la PROENCAT	31
10 Conclusions. 10 propostes dels Enginyers Industrials	32
Annex 1. Potencial de centrals reversibles a Catalunya.....	33
Annex 2. Potencial tècnic d'energia eòlica a Catalunya	35
Annex 3. Potencial tècnic d'energia fotovoltaica a Catalunya	36
Annex 4. Balanç elèctric mantenint la potència nuclear.....	37
Annex 5. Les energies renovables i els materials crítics.....	38



1 Resum executiu

La Unió Europea ha dissenyat un pla amb l'objectiu que els seus estat membres assolixin la neutralitat climàtica l'any 2050.

Catalunya, que va mostrar inicialment un cert lideratge en el desenvolupament de les tecnologies per produir energia amb fonts renovables, ha quedat en els últims anys molt endarrerida a l'hora de desplegar-les i, com a territori de la UE, haurà d'assolir l'esmentada fita.

Amb la intenció d'acotar la magnitud del projecte i donar algunes idees sobre les línies d'actuació a prioritzar, l'Associació/Col·legi d'Enginyers Industrials de Catalunya ha desenvolupat aquest estudi que neix amb la voluntat de ser una eina d'ajuda als ens públics i privats que hauran de prendre decisions i mesures executives per dur a terme la transició.

L'estudi pretén emmarcar el tema de forma general i sense entrar en detalls. Les valoracions realitzades s'han fet sempre mitjançant hipòtesis que s'han documentat el màxim possible però que no deixen de ser aproximacions.

En l'estudi s'ha pres la hipòtesi que, l'any 2050, existiran només tres fonts d'energia fonamentals: electricitat, hidrogen (bé com a element aïllat, bé en forma de combustibles sintètics o amoníac) i biometà. Per projectar la demanda s'ha tingut en compte que aquesta demanda és el producte de dos factors: el PIB i la intensitat energètica. El creixement del PIB s'ha considerat constant i situat en l'1,5% anual i la intensitat energètica s'ha considerat que millorarà, és a dir, decreixerà entre un 1 i un 2% anual, en funció de l'escenari. Això dona una demanda d'energia final per l'any 2050 que oscil·la entre els 16,8 i 12,2 Mtep.

Es té en compte, a més, que el sector del transport reduirà la seva demanda fruit de l'electrificació de la mobilitat urbana i el canvi d'hàbits que fomentarà l'augment del transport col·lectiu, els vehicles compartits i la micro-mobilitat. Per contra, la demanda del sector industrial s'ha majorat com a conseqüència de la reindustrialització que s'hauria de produir al territori.

S'ha projectat la demanda d'energia final a energia primària tenint en compte que l'hidrogen substituirà el gas natural a la indústria, el transport de llarga distància s'abastirà amb combustibles sintètics produïts a partir de l'hidrogen i l'hidrogen gris, utilitzat a la indústria petroquímica, serà substituït per hidrogen exempt d'emissions. A més, s'ha considerat —a fi de reduir el màxim possibles puntes de la corba diària de càrrega elèctrica— que el gas natural per a usos domèstics i terciaris es substitueix per biometà.

S'ha agafat la hipòtesi inicial que tota l'energia primària necessària que pràcticament es redueix a energia elèctrica renovable i biometà, es produeix a Catalunya. Les demandes d'energia elèctrica renovable oscil·larien entre 269 i 195 TWh/any.

Quan s'intenta satisfer aquesta demanda amb energia eòlica i solar fotovoltaica, es veu ràpidament que l'energia eòlica que es pot instal·lar a Catalunya té un topall tècnic que hem avaluat en 20 GW i que la potència ferma necessària comparada amb la demanda de potència fa que aquest escenari no pugui ser satisfet.

La solució passa, per tant, per ser parcialment dependents del subministrament elèctric o per ser parcialment dependents del subministrament d'hidrogen i s'agafa com a alternativa aquesta segona, i es proposa que es generi la meitat de la demanda necessària d'aquest vector energètic i se n'importi l'altra meitat.

D'aquesta manera, la demanda d'energia elèctrica l'any 2050 se situa entre els 135 i 185 TWh/any i per cobrir-la caldria instal·lar entre 78 i 110 GW de potència renovable, principalment fotovoltaica, però 20 dels quals haurien de ser eòlics. Això és una condició necessària però no suficient. En paral·lel, per poder garantir la continuïtat de subministrament, s'hauria de dotar al sistema elèctric d'entre 17 i 21 GW de potència ferma en forma de bateries d'acumulació, centrals reversibles de bombeig i cicles combinats amb hidrogen. També caldrà actualitzar i modernitzar el sistema de distribució elèctrica. Per assolir aquest objectiu, el repte obliga a instal·lar, en l'escenari creixent, 10 MW de potència renovable cada dia, a partir d'avui

mateix, durant els propers trenta anys de manera ininterrompuda.

A més, per poder prescindir de part del parc nuclear l'any 2030, sense incrementar les emissions de diòxid de carboni per sobreutilització de les centrals de cicles combinats amb gas natural, s'hauria d'haver assolit, aquell any, la instal·lació i posada en servei d'entre 26 i 32 GW de potència renovable i entre 5 i 5,4 GW de potència ferma, adequat les xarxes elèctriques per absorbir els nous fluxos d'electricitat i haver potenciat el sistema de generació elèctrica distribuïda.

En paral·lel, s'haurà de dotar al sistema energètic d'una potència de producció d'hidrogen no emissor compresa entre 12 i 17 GW, s'haurà de construir una planta de recepció d'hidrogen al Port de Tarragona, d'almenys 1 TWh de capacitat d'emmagatzematge, i cap a 2035 s'haurà d'iniciar la transformació de la terminal de recepció de GNL de Barcelona en una terminal de recepció d'hidrogen.

Per últim, s'haurà de desenvolupar una nova indústria de producció de biometà a partir de la gestió adequada i el tractament dels residus. S'estima que Catalunya té un potencial de producció de 25 TWh/any que s'hauria d'assolir l'any 2050.

És evident que es tracta d'un repte titànic alhora que d'una gran oportunitat de reindustrialització i que potser precisarà de la presa de decisions temporals com ara prolongar la vida útil de les centrals nuclears si no s'assoleixen els objectius en els terminis programats.

Aquesta transició pot arribar a comprometre fins a 225.000 M€ d'inversió i pot arribar a donar feina directa i de qualitat a 150.000 persones durant 30 anys. Ara bé, hem de ser plenament conscients que aquests objectius es plantegen a tot l'Estat i a la Unió Europea i, a fi d'assegurar l'assoliment d'aquest pla, ens haurem d'anticipar agilitzant la tramitació de permisos, establint els mecanismes i polítiques públiques adients per fomentar les inversions i poder disposar del capital empresarial i humà, a més de tenir la flexibilitat suficient per poder anticipar i adaptar-nos a les dificultats tecnològiques i geopolítiques que puguin aparèixer durant tot aquest període.

Ha d'arribar l'hora de passar a l'acció, ja anem massa endarrerits.

2 Introducció

Quan s'analitza qualsevol qüestió relacionada amb l'energia, s'ha de fer des de tres punts de vista: garantia de subministrament, economia i preu, i impacte mediambiental i social.

La crisi de la covid primer, i la invasió d'Ucraïna per part de Rússia darrerament, han posat de manifest la importància de mantenir equilibrat el triangle energètic i com el fet de no tenir adequadament garantit el subministrament pot influir de forma negativa en els preus generant situacions de turbulència que, en el millor dels casos, poden ser transitòries. És molt important, per tant, que els estats membres d'Europa i les seves regions disposin de polítiques energètiques que, en la mesura de les seves possibilitats, equilibrin els tres vèrtexs del triangle.

Els darrers anys la Unió Europea ha posat l'èmfasi en el darrer vèrtex del triangle i ha decidit que el 2050 serà la primera àrea exempta d'emissions de CO₂ i a la vegada pretén assolir el major nivell possible d'autosuficiència energètica i d'estabilitat de preus.

Per materialitzar aquest objectiu, la Unió Europea ha dissenyat tot un programa que ha denominat *Green Deal* i que disposa de fites intermèdies com el *Fit for 55 Package* amb l'objectiu d'assolir un nivell d'emissions l'any 2030 equivalent al 45% de les emissions registrades el 1990 que va acompanyat d'una important dotació econòmica.

Arran de la publicació del *Green Deal*, els territoris que conformen la Unió Europea, entre ells Catalunya, han de dissenyar una transició energètica molt ambiciosa, que no serà fàcil, i que ens ha de portar a l'esmentat l'objectiu.

En l'actualitat, Catalunya té cobertes les seves necessitats energètiques en base a tres elements fonamentals: electricitat (produïda amb energia nuclear, energia hidroelèctrica i gas natural, amb una petita contribució d'energies renovables), derivats del petroli (per resoldre les necessitats de mobilitat) i gas natural (per les demandes tèrmiques tant als sectors industrials com domèstic i terciari). Aquest mix li dona una se-

guretat de subministrament molt elevada tant pel que fa a energies primàries com a subministrament elèctric. Qualsevol nou model haurà de tenir un grau de seguretat de subministrament equivalent.

En l'àmbit industrial, Catalunya té una important indústria química que suposa aproximadament el 50% del sector a Espanya amb una forta concentració a Tarragona per la producció de combustibles, polímers i productes químics diversos. Aquest sector té un consum considerable de matèries primeres, derivades principalment del petroli, que en el marc del *Green Deal* i els altres objectius de la Unió Europea requerirà una profunda transformació.

D'altra banda, la resta de sectors productius requeriran tanmateix transformacions importants per assolir la neutralitat climàtica i avançar cap a l'economia circular, on els residus siguin elements útils per als processos productius. Tots aquests aspectes sectorials hauran de ser elements clau i complementaris per assolir la neutralitat climàtica.

Hem de tenir en compte que l'objectiu final és la descarbonització de l'economia catalana i per assolir-la caldrà electrificar tot el que sigui possible, però sobretot trobar alternatives de zero emissions netes als combustibles fòssils que constitueixen la font d'energia de la indústria i el transport.

Amb el *mix* energètic que hem comentat, Catalunya va generar unes emissions de gasos d'efecte hivernacle de 44 Mt CO_{2eq}¹ l'any 2019, un 132% en relació amb les emissions de 1990 prenent aquelles com a valor 100. De fet, les emissions de diòxid de carboni relacionades amb l'ús de combustibles fòssils van ser de 31,5 Mt CO₂, la resta va ser conseqüència de processos industrials que desprenen gasos d'efecte hivernacle, de l'agricultura i la ramaderia i de la gestió inadequada dels residus.

Catalunya té, per tant, un llarguíssim camí per recórrer per assolir la primera fita de 2030, on el seu nivell d'emissions hauria de ser de 18 MtCO_{2eq}/any, i hauria de reduir a més de la meitat les emissions actuals, cosa que posa de manifest la dificultat de la tasca a assolir.

¹ Font: *Inventari Emissions de GEH a Catalunya*. Gencat

Catalunya ha sigut pionera al llarg de la història en adoptar solucions innovadores en matèria energètica. Recordem que Barcelona va ser la primera ciutat d'Espanya en disposar de xarxa de gas canalitzat l'any 1843. Les colònies tèxtils i de cuir catalanes, aprofitant l'energia del Llobregat i el Ter, van ser un referent europeu durant el segle XIX i només vint anys després que la primera central hidroelèctrica fos construïda per Westinghouse a les cascades del Niàgara, entrava en funcionament la Central de Cabdella, construïda per Energia Elèctrica de Catalunya i que va ser una de les primeres d'Europa.

Dècades després, en el que va ser la primera onada de les renovables modernes, també hi van haver iniciatives pioneres com: la creació d'una empresa eòlica a Catalunya, Ecotècnia, que va instal·lar el primer aerogenerador a la península el 10 de març de 1984, a Vilopriu, Girona; la instal·lació dels primers digestors de biogàs a partir de residus agraris (TApS 1983 i Catalana de Gas/CIDA Hidroquímica 1983); l'aprofitament del biogàs de l'abocador metropolità del Garraf en una planta de cogeneració (ESEA/ Catalana de Gas 1982); el primer projecte de generació elèctrica fotovoltaica autònoma d'àmbit municipal al Solsonès (TTA 1987); la fabricació dels primers onduldadors i convertidors per a la indústria fotovoltaica (Ambar 1985); les fàbriques de captadors solars tèrmics (LKN, SOLECO, etc.); microxarxes elèctriques, etc.

Transcorreguts quasi quaranta anys d'aquelles fites, Catalunya pateix un incompreensible retard en la implantació d'energies renovables que fan que l'any 2019, només el 8% de la seva energia elèctrica fos produïda amb energies renovables no hidràuliques mentre que a la resta d'Espanya aquest valor superava el 30%.

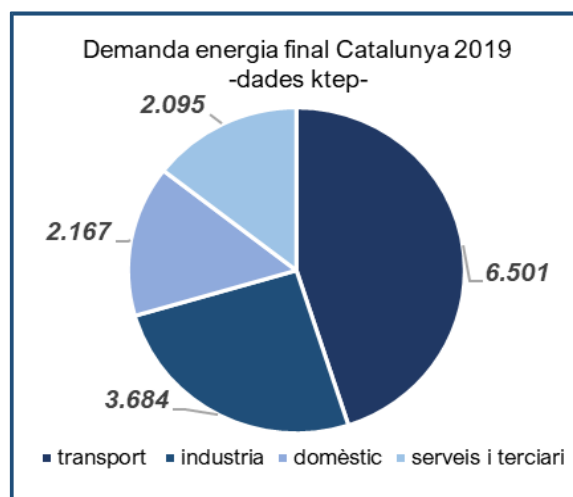
El govern de Catalunya tot just ha publicat el document *Prospectiva Energètica de Catalunya 2050, PROENCAT*, mitjançant el qual pretén assolir els objectius fixats per la Unió Europea. Les línies mestres d'aquest document es basen en una reducció radical de la intensitat energètica i la pràctica total electrificació de l'economia catalana, que arribaria, l'any 2050, a un 76% del consum d'energia final i al qual dedicarem un apartat.

El Col·legi/Associació d'Enginyers Industrials de Catalunya pretén, amb aquest estudi fet des del rigor i el pragmatisme, estimar l'evolució de la demanda d'energia final a Catalunya amb diversos escenaris i analitzar, per cadascun d'ells, la manera de cobrir-la, tenint present en tot moment l'etapa transitòria entre el moment actual i 2050 amb la finalitat de no comprometre la competitivitat de l'economia catalana ni el nivell de confort dels catalans.

Hem de tenir en compte, això no obstant, que es tracta d'una prospectiva i com a tal es basa en hipòtesis que es podran materialitzar o no. Atès que, a més, contempla un període de temps considerable de quasi trenta anys, serà necessari establir fites intermèdies d'assoliment i refer periòdicament l'estudi a mesura que canviïn les condicions de contorn del mateix o si no s'assoleixen els objectius.

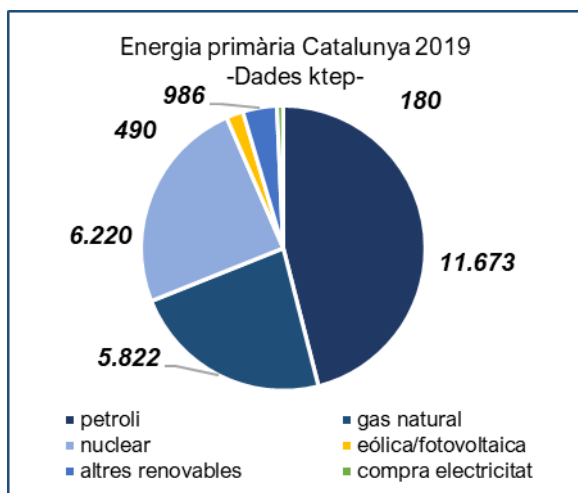
3 Situació actual a Catalunya

L'any 2019, la demanda d'energia final a Catalunya va ser de 14.447 ktep (168 TWh) que es van distribuir de la següent forma: 45% transport, 25,5% indústria, 15% domèstic i 14,5% serveis i sector terciari.



La demanda d'energia primària, aquest mateix any, va ser de 25.371 ktep amb 11.673 ktep de derivats de petroli, 5.822 ktep de gas natural, 6.220 ktep d'energia nuclear, 304 ktep d'energia hidroelèctrica, 682 ktep de biomassa i biocombustibles, 490 ktep d'energia solar

fotovoltaica i 180 ktep de compra d'energia elèctrica produïda fora de Catalunya o fent ús de carbó.



El factor d'eficiència de transformació d'energia primària en energia final català va ser de només el 57%, ja que es veu altament penalitzat per l'elevada dependència de l'energia nuclear atès que l'eficiència de les centrals es mesura com la quantitat d'energia tèrmica que precisen les seves turbines per produir una unitat d'energia elèctrica i que no supera el 34%. Un efecte similar es dona amb la producció d'energia elèctrica amb centrals de cycle combinat amb gas natural que tenen una eficiència del 59%.

En el cas de les energies renovables, la convenció internacional, i atès que no consumeixen combustible, fa que el factor d'eficiència de transformació sigui del 100% tot i que una placa fotovoltaica és capaç de convertir en energia final al voltant del 20% de la radiació solar incident i que l'energia eòlica, segons dictamina la llei de Betz, només pot aprofitar, per convertir en electricitat, fins al 59% de l'energia cinètica del vent.

Això vol dir que un increment de la implantació de renovables també farà millorar substancialment l'eficiència de transformació d'energia primària i, en conseqüència, la intensitat energètica referida a energia primària.

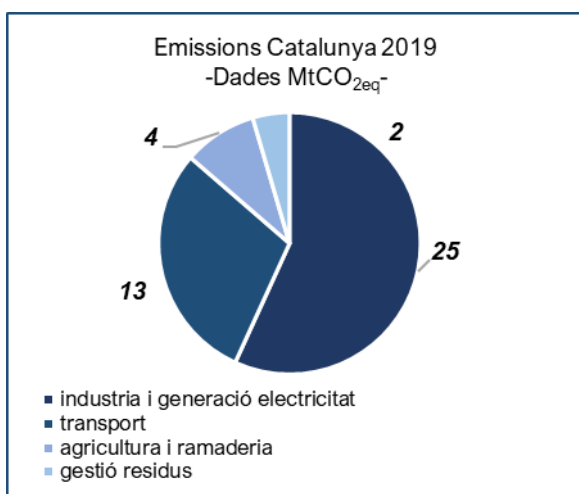
El que no es considera tan senzill és reduir la intensitat energètica referida a energia final. En el sector domèstic es poden renovar

electrodomèstics i es poden substituir equips tèrmics per bombes de calor, encara que les modernes calderes de condensació tenen rendiments propers al 100% però caldrien, també, construccions més ben aïllades per obtenir grans estalvis. En el sector del transport, és evident que un motor elèctric és més eficient que un motor de combustió (pel mateix input energètic tenen una eficiència del 80% enfront del 15%, respectivament) i amb la mobilitat elèctrica es poden assolir certs estalvis. El sector industrial que, per raons merament de competitivitat, ja ha fet grans esforços per millorar la seva intensitat energètica els darrers anys i on la cogeneració està abastament implantada, tindrà molta dificultat per millorar-la atès que els seus processos basats en l'escalfament de fluids, l'assecat o la fusió de matèries primeres, estan sotmesos a lleis físiques i l'amortització de les seves instal·lacions es fa a llarg termini. A més, l'electrificació del sector industrial és molt complicada en processos que exigeixin altes temperatures i contraproductent en els de baixa temperatura si l'alternativa és produir calor amb resistències elèctriques.

Si ens centrem en el sector elèctric, Catalunya té una potència ferma instal·lada de 3,8 GW de cycles combinats, 3 GW d'energia nuclear i 0,97 GW de cogeneració. És a dir, fent treballar, per exemple, 8.000 h/any les centrals nuclears i la cogeneració, i 1.270 h/any els cycles combinats es pot garantir folgadamente la demanda elèctrica que, l'any 2019, va ser de 2.946 ktep (42,2 TWh).

Si analitzem l'aprovisionament de gas natural, Catalunya està interconnectada a la xarxa ibèrica de gasoductes pel Sud i el Nord-oest i a més, a Barcelona hi ha instal·lada la planta de regasificació més gran de la Mediterrània, amb una capacitat d'emmagatzematge de 447 ktep (5,2 TWh) i una capacitat d'emissió de 544,3 GWh/dia, és a dir, quatre vegades més gran que la demanda d'aquest combustible a Catalunya.

Des del punt vista ambiental, com ja s'ha dit, les emissions de diòxid de carboni són degudes principalment a l'ús de derivats del petroli i de gas natural i se situen en 44 Mt CO₂/any de les quals 25 Mt es generen a la indústria i en les centrals de generació d'energia elèctrica, 13 Mt són degudes al transport, 4 Mt a l'agricultura i ramaderia i 2 Mt al tractament de residus.



Això dona unes emissions per capita de 5,7 t CO₂/hab. any, una mica inferior a la mitjana de la UE que se situa en 6,5 t CO₂/hab. any, similar a la resta d'Espanya i per sota dels valors d'Alemanya de 8,8 t CO₂/any.

Podem concloure, per tant, que Catalunya té, amb el seu sistema actual d'energia, garantit el subministrament, presenta unes ràtios d'emissions de CO₂ millors que la mitjana europea però té un dèficit estructural de potència renovable instal·lada que haurà de corregir els propers anys.

4 Projectió de la demanda d'energia final a 2050

La demanda de l'energia final ve determinada pel producte de dos factors: el producte interior brut i la intensitat energètica referida a energia final.

$$\text{Energia final} = \text{PIB} * \text{intensitat energètica}$$

Aplicant aquesta fórmula i coneixent l'evolució prevista del PIB i de la intensitat energètica es poden projectar escenaris a 2050.

El PIB català a 2019 era de $249,9 * 10^3$ M€ i al principi d'aquest segle era de $127,6 * 10^3$ M€². Això vol dir que durant aquest segle hi ha hagut un increment mitjà del PIB a Catalunya del 3,6% anual.

No hi ha dades de l'evolució de la intensitat energètica de Catalunya però, per aproximació, podem agafar les d'Espanya. L'any 2000, la intensitat energètica referida a l'energia final a Espanya³ era de 123,5 tep/M€ i l'any 2018 de 69,8 tep/M€, cosa que mostra un factor de decreixement mitjà del 3,2% anual.

Com es pot veure, ambdós factors, pràcticament s'han compensat els darrers anys i, així, la demanda d'energia final s'ha mantingut pràcticament constant a Catalunya en el que portem de segle (demanda d'energia final a 2000, 13.600 ktep i a 2019, 14.447 ktep).

Tot indica, però, que ni l'economia creixerà els propers anys a la velocitat que ho ha fet els darrers i la intensitat energètica, una vegada esgotada la via de l'estalvi, es veurà limitada per les lleis de la física i tendirà a acostar-se a una asímptota.

A l'hora de projectar la demanda d'energia cap al 2050, obligatòriament, cal fer hipòtesis que portaran a diferents escenaris. Nosaltres, després d'analitzar i tenir en compte el següents documents: *Fit for 55 Package* de l'European Council, *The Net Zero Transition* de McKinsey,

² Dades Inescat

³ *Libro de la Energía en España*. 2018, MITERD

Net Zero by 2050 de l'Agència Internacional de l'Energia i el *PNIEC* del Ministeri de Transició Energètica i Repte Demogràfic, i conscients del grau d'incertesa que comporten, proposem aquests tres escenaris:

- Creixent. El PIB creixerà 1,5% de mitjana i la intensitat energètica millorarà un 1%.
- Constant. El PIB i la intensitat energètica es continuaran compensant.
- Decreixent. El PIB creixerà un 1,5% de mitjana i la intensitat energètica millorarà un 2%.

Hem de dir, també, que les hipòtesis de creixement econòmic plantejades estan en línia amb les contemplades en la PROENCAT 2050 que ha publicat recentment la Generalitat de Catalunya.

En l'escenari creixent la demanda d'energia final el 2050, vindrà donada per l'expressió:

$$\begin{aligned} \text{DEF50cre} &= \text{DEF19} \cdot \Delta \text{PIB} \cdot \nabla \text{IE} = \\ &= 14.447 \cdot (1,015)^{31} \cdot (0,99)^{31} = \\ &= 16.784 \text{ ktep (195 TWh)} \end{aligned}$$

En l'escenari constant la DEF50con = 14.447 ktep (168 TWh) i,

finalment, en l'escenari decreixent, el valor vindrà donat per:

$$\begin{aligned} \text{DEF50dec} &= \text{DEF19} \cdot \Delta \text{PIB} \cdot \nabla \text{IE} = \\ &= 14.447 \cdot (1,015)^{31} \cdot (0,98)^{31} = \\ &= 12.253 \text{ ktep (142 TWh)} \end{aligned}$$

	Creixent	Constant	Decreixent
DEF50 (ktep)	16.784	14.447	12.253
DEF50 (TWh)	195	168	142

Taula 1. Demanda d'energia final a 2050 per escenaris

Estimem, per tant, que la demanda d'energia a Catalunya el 2050 estarà continguda en una forquilla +17%, un -11% respecte a la demanda de l'any 2019.

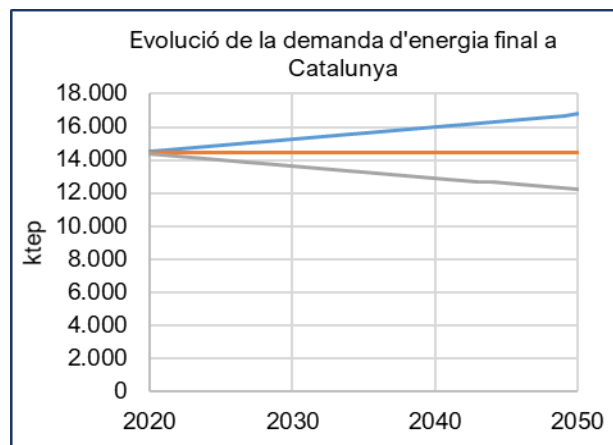


Figura 1. Escenaris d'evolució de la demanda d'energia final a Catalunya (blau creixent, vermell constant i gris decreixent)

El següent pas consistirà en segregar la demanda. La demanda d'energia final es duu a terme en diversos àmbits que proposem agrupar en: transport, indústria, domèstic i terciari-primari.

L'any 2019 el transport suposava el 45% de la demanda d'energia a Catalunya amb 6.506 ktep, tenint en compte només el transport per carretera (fonamentalment) i l'electricitat consumida pel sector ferroviari (en menor mesura). Convé cridar l'atenció que tan el querosè destinat al transport aeri (1.730 ktep) i el fueloil destinat al transport marítim (2.058 ktep) apareixen en les estadístiques d'energia primària però no en les d'energia final, ja que es considera que produeixen les seves emissions fora de Catalunya⁴.

Segons l'Idescat, Catalunya posseïa l'any 2019 el 14,5% del parc espanyol de vehicles, tant de vehicles lleugers com pesants. Únicament en motocicletes, aquest percentatge pujava fins al 24%. Les dades són coincidents amb CORES⁵ que donava per Catalunya la següent demanda: GLP 729 ktep, benzina 975 ktep, gasoil 4.707 ktep (3.801 gasoil A automoció), querosè 1.730 ktep, fueloil 2.058 ktep i altres derivats (matèries primeres petroquímica) 1.474 ktep. De les dades, crida l'atenció que la demanda de fueloil, utilitzat

⁴ Aquest criteri també el fa servir CORES quan elabora les estadístiques de demanda de productes petrolífers a Espanya.

⁵ Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos

bàsicament en transport marítim, més que duplica la demanda de benzina.

Si considerem que l'eficiència d'un motor elèctric pot arribar a ser del 95% (incloent frenada regenerativa) i la d'un motor de combustió —en el millor dels casos— pot situar-se entre un 15 i un 25%, quan segreguem la demanda en els tres escenaris que estem considerant haurem de tenir en compte que la demanda energètica dels vehicles amb bateria (BEV) tindran una demanda energètica d'un quart dels actuals vehicles amb motor de combustió. El rendiment dels vehicles elèctrics amb pila de combustible i els que facin servir combustibles sintètics o biocombustibles es considerarà similar a l'actual, si bé amb capacitat d'arribar a les zero emissions netes.

La demanda de mobilitat i el transport canviaran de forma significativa. En els sistemes de transport de curta i mitjana distància, a més, es produiran canvis progressius d'hàbits que inclouran: l'augment de l'ús dels transports públics a les ciutats, anar en bicicleta, patinets, caminar, teletreballar, compartir cotxe o agafar autobusos per a viatges a ciutats que, d'altra manera, es farien en cotxe, així com substituir els viatges aeris de mig radi per ferrocarril d'alta velocitat. Molts d'aquests canvis de comportament representaran adaptacions en les formes de vida i, com a tals, requeriran un cert grau d'acceptació pública i, fins i tot, d'entusiasme. Molts també requeririen noves infraestructures, des de carrils bici a xarxes ferroviàries de qualitat o carregadors elèctrics. Respecte al transport per mercaderies, s'espera que augmenti el transport per ferrocarril (actualment només el 4% del volum total a Espanya), substituint parcialment els camions.

Tots aquests canvis i tendències redundaran en una disminució de les necessitats energètiques en el transport i la mobilitat.

En sentit invers, si el que es pretén es reindustrialitzar Catalunya i produir part dels béns d'equip que en l'actualitat s'importen, és bastant probable que la demanda energètica del sector industrial guanyi pes en els propers anys i passi a ser el sector capdavanter en el que a demanda energètica es refereix.

Cal indicar també que la indústria auxiliar, derivada de les xifres que es desenvoluparan en aquest document, pot ser molt rellevant.

En aquest estudi s'ha considerat que la indústria petroquímica catalana se sotmetrà a un procés de transformació vers una indústria sostenible però seguirà tenint i, potser, incrementarà el seu paper rellevant a Europa. El mateix s'espera de la indústria relacionada amb la mobilitat que hauria de fer valdre el seu potencial per fer de Catalunya un centre de referència en la producció de vehicles elèctrics, tant automòbils com ferrocarrils. Hauria d'aparèixer una nova línia de negoci relacionada amb l'emmagatzematge d'energia que inclouria la fabricació d'acumuladors electroquímics, electrolitzadors i piles de combustibles i s'hauria de desenvolupar el sector de l'electrònica de potència relacionat amb l'energia i la mobilitat elèctrica⁶. La mineria i el ciment haurien de mantenir les seves quotes actuals i el sector tèxtil, seguint l'evolució dels darrers anys, hauria de recuperar part de l'activitat de la què va gaudir durant el segle passat.

La demanda d'energia final a 2050, ajustada amb aquestes hipòtesis, quedaria de la següent manera:

ktep	Transport	Indústria	Domèstic	Terciari /Prim.	Total
Creixent	4.535	7.303	2.479	2.467	16.784
Constant	3.903	6.287	2.124	2.133	14.447
Decreixent	3.311	5.331	1.818	1.793	12.253

Taula 2. Demanda d'energia final a 2050 per escenaris i sectors

Cosa que significa que el transport consumeix el 27% de l'energia final; la indústria, el 43,5%; el domèstic, el 14,7%; i el terciari-primari, el 14,8%.

⁶ A títol d'exemple, si es decidís que els onduladors necessaris en la tecnologia fotovoltaica fossin produïts a Catalunya, caldria produir 65 onduladors diaris durant el propers trenta anys.

5 Necessitats d'energia primària a Catalunya a 2050

Per cobrir la demanda energètica estimada en l'apartat anterior s'agafen com a solucions energètiques principals les següents: electricitat, hidrogen (com a tal o en forma de combustibles sintètics o amoníac) i biocombustibles.

També hi hauran altres fonts d'energia complementàries i no menyspreables com la biomassa, solar tèrmica i electrotèrmica, RSU renovables, etc., però menys significatives per la qual cosa no s'analitzen en detall.

Pel que fa al transport per carretera, considerem que el 60% de la demanda correspondrà a vehicles elèctrics (BEV), un 20% de la demanda es cobrirà amb hidrogen, i l'altre 20% amb combustibles sintètics i/o biocombustibles. Haurem d'afegir el querosè d'aviació: 2.019 ktep, 1.730 ktep i 1.481 ktep, en funció de l'escenari, que serà substituït per combustibles sintètics i, d'igual manera, el fueloil marítim (2.402 ktep, 2.058 ktep, 1.762 ktep) que serà substituït per hidrogen (o transformat en forma d'amoníac) i combustibles sintètics.

Pel que fa a la indústria, considerarem que el 40% de la demanda energètica de la indústria catalana es cobrirà amb energia elèctrica i el 60% amb hidrogen i biocombustibles.

El sector domèstic s'electrificarà d'una manera intensiva i arribarà al 70% la demanda coberta amb aquest vector i l'altre 30% amb biocombustibles gasosos.

L'electrificació dels sectors terciari i primari arribarà al 80%, i serà especialment intensa en el sector terciari, on arribarà pràcticament al 100%. L'altre 20%, bàsicament del sector primari, es cobrirà amb biocombustibles líquids i gasosos. La demanda dels vectors energètics anteriors i combustibles del 2050, seguint els principis enumerats en els paràgrafs anteriors, quedarà configurada de la següent manera (Taula 3):

ktep	Electricitat	Hidrogen	Com. sint.	Bioc. liq.	Bioc. gas.	Total
Creixent	8.593	7.204	3.023	880	1.506	21.205
Constant	7.399	6.188	2.594	757	1.062	18.000
Decreixent	6.267	5.274	2.214	642	1.099	15.496

Taula 3. Demanda de vectors energètics i combustibles a 2050 per escenaris

Si tenim en compte que els combustibles sintètics es produeixen amb hidrogen mitjançant un procés Fisher Tropsch, o alguna de les seves variants, que són necessaris 0,3 kg d'hidrogen per cada kg de parafina obtinguda i que la relació de poders calorífics superiors és de 39,5 kWh/kg i 12 kWh/kg respectivament, podem transformar la taula anterior en una taula de demandes d'energies intermèdies, considerant com a tals els vectors energètics: electricitat i hidrogen.

ktep	Electricitat	Hidrogen ¹	Bioc. liq.	Bioc. gas.	Total
Creixent	8.593	10.189	880	1.506	21.168
Constant	7.399	8.749	757	1.062	17.968
Decreixent	6.267	7.460	642	1.099	15.468

Taula 4. Demanda d'energies intermèdies i primàries a 2050 per escenaris

Ara s'haurien de fer hipòtesis de com produir l'hidrogen. En farem tres: tot l'hidrogen és autoproduït i verd, només la meitat és autoproduït i verd, i tot és importat. La demanda d'energia elèctrica, suposant que l'eficiència dels electrolitzadors fos del 70%, seria en aquests tres supòsits:

TWh ⁸	H2 (tot verd)	H2 (1/2 verd)	H2 (tot importat)
Creixent	269	185	100
Constant	231	159	86
Decreixent	195	135	73

Taula 5. Demanda d'energia elèctrica per escenaris en funció d'on es produeix l'hidrogen

⁷ La quantitat d'hidrogen s'obté sumant el valor de la columna hidrogen de la taula 3 més el valor de la columna de combustibles sintètics multiplicat per 0,3 i 39,5 i dividit per 12.

⁸ Els valors de la quantitat d'electricitat necessària s'obtenen de sumar els valors de la columna d'electricitat de la taula 4 més els valors de la columna d'hidrogen dividit per l'eficiència dels electrolitzadors (0,7) i multiplicant el resultat per 0,01163, que és el factor de conversió de ktep a TWh.

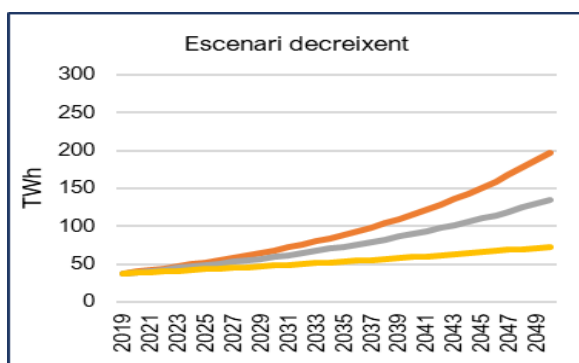
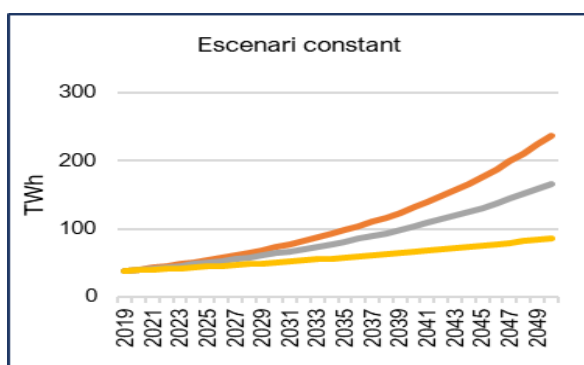
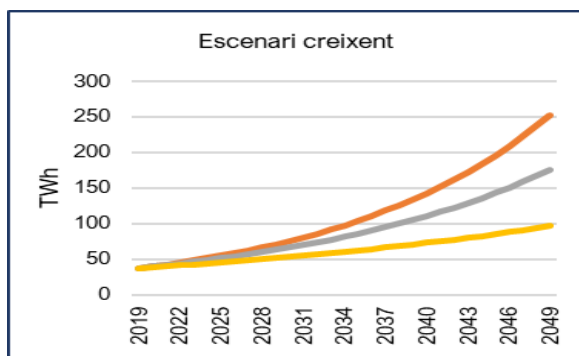


Figura 2. Evolució de les necessitats de generació d'energia elèctrica en funció del nivell d'independència en la generació d'hidrogen (vermell H₂ tot verd, blau H₂ mig verd i groc H₂ tot importat).

La primera conclusió que podem treure d'aquestes dades és que electrificar l'economia no serà pas senzill. Aviat es confon aquest concepte amb substituir l'energia elèctrica que fem servir habitualment per electricitat verda, però l'electricitat constitueix actualment, només, el 25% de l'energia final.

En el nostre cas per electrificar l'economia en l'escenari creixent i sent energèticament independent, caldria produir 269 TWh amb fonts renovables. Si ens belluguéssim entre els escenaris constant i decreixent, que potser semblen els més raonables, caldrien entre 231 i 195 TWh.

6 Possibles solucions per cobrir la demanda

6.1 Determinació de la capacitat màxima d'energies renovables que permet el territori

Com hem vist, la descarbonització de Catalunya se centra principalment en l'ús de dos vectors energètics fonamentals: l'electricitat i l'hidrogen, si bé aquest segon es produirà també, encara que potser no de manera exclusiva, amb el primer i també amb biocombustibles líquids i gasosos.

Haurem d'analitzar, per tant, la capacitat màxima de Catalunya d'autoproduir electricitat renovable i biocombustibles.

La mecànica que seguirem consistirà en analitzar el potencial seguint el triangle de potencial.

En el cas d'aquest estudi intentarem avaluar el potencial tècnic de les diverses tecnologies amb la qual cosa, amb gran probabilitat, les nostres estimacions quedaran per sobre de la realitat.

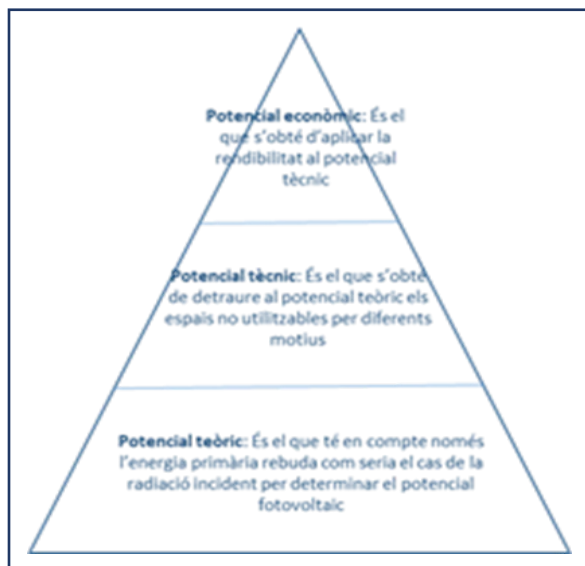


Figura 3. Triangle de potencial

El cas de l'electricitat és especialment complicat perquè la seva demanda, en qualsevol dels

escenaris analitzats, serà molt elevada i és el que s'analitzarà en primer lloc.

6.2 Hipòtesis per determinar el potencial tècnic de generació d'energia elèctrica

Catalunya pot produir, amb els 1,9 GW de potència hidroelèctrica instal·lada, uns 5 TWh/any d'energia elèctrica (veure annex 1). El valor oscil·la en funció del règim de pluges de l'any i la gestió dels embassaments. No es considera viable incrementar la potència amb centrals convencionals i més endavant s'estudiarà la possible modificació de les centrals existents per fer-les reversibles amb la finalitat bàsica de generar potència ferma que reforci el sistema elèctric. Tot i mantenir-se la capacitat instal·lada, a nivell de producció, és possible que pels efectes del canvi climàtic disminueixi el règim de pluges i la capacitat de producció d'energia hidroelèctrica però, malgrat això, es considera com a hipòtesi el manteniment de potència i producció d'energia hidroelèctrica actual d'aigua fluent. En l'annex 1 es mostra un mapa amb la situació dels embassaments de Catalunya i s'analitza la possibilitat de transformar part d'ells en sistemes reversibles.

En relació amb la producció d'energia elèctrica mitjançant energia eòlica, Catalunya disposa en l'actualitat de 1,3 GW que tenen poc més de 2.000 h/any d'utilització i generen uns 2,6 TWh/any d'energia. Considerem que aquests parcs es repotenciaran els propers anys amb la qual cosa guanyarien en potència, considerem un 10% addicional i en hores de funcionament (3.100 h/any). D'aquesta manera es podria arribar als 1,6 GW de potència i als 4,4 TWh d'energia.

En l'annex 2 es fa un estudi del potencial tècnic d'energia eòlica a Catalunya prenent com a referència el Mapa Eòlic Ibèric elaborat, mantingut i actualitzat pel CENER i basat en el mapa eòlic europeu. En l'esmentat estudi s'arriba a la conclusió que Catalunya té un límit de potència eòlica tècnica de 20 GW, distribuïts de la següent manera:

Tipus de parc	Potència (GW)	h/any	Energia (TWh/any)
Existent repotenciat	1,4	3.100	4,4
Nou terrestre	14	3.000	42
Nou marí	4	4.200	16,8
Total	19,4	3.260	63,2

En síntesi hi cabrien uns 3.300 aerogeneradors de 6 MW de potència (potser en un futur la tecnologia evoluciona i sorgeixen altres tipus de màquines) que podrien arribar a produir 63,2 TWh/any d'energia elèctrica.

Si analitzem la generació amb energia fotovoltaica, Catalunya tenia, l'any 2020, instal·lats 281 MW que van produir 380 GWh d'energia elèctrica, amb una utilització de 1.347 heq/any.

L'energia fotovoltaica serà l'element fonamental de l'electrificació de Catalunya que disposa d'uns nivells d'irradiació molt uniformes, cosa que vol dir que tot el seu territori és tècnicament susceptible de poder acollir instal·lacions. On existeix una limitació és en la possibilitat de fer instal·lacions en teulades que, amb el nivell d'edificació actual, només podrien acollir 16,5 GW (veure annex 3) i això no és, ni de bon tros, suficient per assolir els objectius necessaris.

El límit tècnic en el cas de l'energia fotovoltaica no és, doncs, ni el recurs ni la disponibilitat d'espai, tot i que caldrà una participació a tots els nivells de la societat per consensuar la magnitud del que representa aquest nou ús en terrenys urbanitzats i en terrenys rurals. Caldrà, doncs, aprofitar totes les oportunitats de posada en valor de terrenys poc productius susceptibles d'aprofitament energètic ja sigui en exclusivitat o integrat i complementant altres usos.

Caldran, també, grans inversions que, aprofitant els atributs d'aquesta tecnologia, poden implicar des de petites inversions d'autoproducció en l'àmbit domèstic o industrial fins a grans centrals, passant pels nous models que obre aquesta tecnologia com poden ser les comunitats energètiques, les microxarxes municipals i industrials, etc.

Però aquesta forma de generació tan distribuïda i intermitent canvia radicalment el paradigma tradicional de la generació i distribució elèctrica. En una primera fase es pot preveure que no hi ha topall tècnic a anar connectant generació distribuïda a les infraestructures existents, ja que aquestes la veuen com una reducció aparent del consum. A mida que aquesta augmenta i comença a esdevenir un consum negatiu, caldrà —en paral·lel— adequar el sistema elèctric perquè ni la regulació actual ni les infraestructures existents esdevinguin una nova barrera.

La xarxa elèctrica del futur amb una presència massiva d'instal·lacions fotovoltaïques, més que un sistema de generació, transport i distribució, tendirà cap un eixam de microxarxes.

Arribats a aquest punt, convé assenyalar que no és el mateix parlar de capacitat de generació elèctrica instal·lada que de potència ferma. La potència ferma és aquella que està disponible en el moment que la demanda la necessita. Les tecnologies renovables de què hem parlat fins ara aporten poca potència ferma perquè parteixen de fonts energètiques intermitents lligades a les condicions meteorològiques de cada moment.

Determinar la relació entre la capacitat instal·lada i la potència ferma no és pas fàcil i tot i ser conscients que la forma adequada de fer-ho és mitjançant la simulació dinàmica dels sistemes elèctrics utilitzant sistemes predictius estocàstics, farem servir un mètode aproximat que —com a tal potser és imprecís— consisteix en assignar uns factors de fermesa a cadascuna de les diferents tecnologies. Quan parlem per exemple d'energia nuclear, el factor vindrà determinat pel nombre d'hores que, de mitjana, una central resta aturada durant un any per fer manteniments programats, canvis de combustible o reparar averies, i se situa al voltant del 0,9. En el cas de l'energia eòlica, el càlcul no és tan evident i per determinar-lo s'apliquen sèries estadístiques que donen un valor de 0,07 que té en compte la seva intermitència lligada a la meteorologia, averies i aturades per manteniment i que podem traduir com que, quan es doni la demanda màxima, només es podrà comptar amb un 7% de la potència eòlica.

A continuació, es presenta la taula de factors de conversió de potència instal·lada en potència ferma (fcp), que es tindrà en compte a l'estudi.

Tecnologia	fcp
Hidràulica	0,44
Eòlica	0,07
Fotovoltaica	0,0
Solar termoelèctrica	0,12
Residus renovables	0,55
Nuclear	0,92
Cicles combinats de gas	0,92
Cogeneració	0,92
Generació amb H2	0,92
Residus no renovables	0,55
Bateries	0,77
Bombeig	0,77

Taula 6. Factors de conversió de potència

És clar, per tant, que a més d'instal·lar energia hem de dotar al sistema d'un mínim de potència ferma garantida i les tecnologies que la donen són: l'energia nuclear, la generació tèrmica tant de cicles combinats com de cogeneració, les bateries i el bombeig.

En relació amb l'energia nuclear, es té en compte que es duu a terme el pla d'aturades de centrals anunciat pel govern de l'Estat. És a dir, l'any 2030, el parc nuclear instal·lat a Catalunya quedaria reduït a només 1 GW de potència, i l'any 2040 desapareixeria totalment. No es té en compte, en l'estudi general, la possible substitució de la potència nuclear actual per nous reactors modulars (SMR) si bé hi ha països del nostre entorn com França i el Regne Unit que han presentat importants plans de futur basats en aquesta tecnologia. Únicament a títol complementari, en l'annex 4, es farà una comparació entre la solució de l'estudi general i

la solució que s'obtidria mantenint 3 GW de potència nuclear a Catalunya.

En relació amb la generació d'electricitat amb centrals de cicle combinat que tenen ràtios de potència ferma alts, considerem com a hipòtesis que es manté la potència instal·lada actual i el subministrament de gas natural fins l'any 2030. A partir d'aquell moment, s'inicia una transformació progressiva de les centrals i la cogeneració cap a plantes alimentades amb hidrogen.

Cal dir, això no obstant, que els cicles combinats funcionen amb hidrogen, si aquest és verd, seran instal·lacions que garantiran potència ferma però la seva eficiència energètica no seria l'òptima. En efecte, en el procés de producció d'hidrogen verd es perd el 30% de l'energia elèctrica renovable i la central de cicle combinat, amb la tecnologia actual, té un rendiment proper al 60%. En acabar el procés haurem transformat 100 unitats d'electricitat en només 42, això sí, les 100 les tindríem en vall, quan no són aprofitables, i les 42 en punta, que és quan es necessiten. És cert també que en els propers anys l'eficiència dels electrolitzadors s'espera que millori fins al 80% i les noves centrals es construïran amb piles de combustible d'alta temperatura que permetran rendiments, aprofitant la calor, de fins al 80% i, com a resultat l'eficiència milloraria fins al 65%.

En el cas de les centrals de cicle combinat, a més, es considera fonamental mantenir els emplaçaments actuals de cara a potenciar el concepte de generació distribuïda i produir l'energia elèctrica a prop del consum i dels centres d'emmagatzematge d'hidrogen. Convé recordar que 2,8 dels 3,8 GW instal·lats a Catalunya es troben a Barcelona o a municipis limítrofs que és on es concentra bona part de la demanda elèctrica i els altres 0,8 GW, a 30 km de Tarragona i el seu pol petroquímic.

En el cas de la cogeneració es considera que es manté la potència instal·lada fins al 2040 però a partir d'aquell moment les instal·lacions deixaran de tenir sentit ja que el preu de l'electricitat, en la mesura que l'energia renovable sigui majoritària, hauria de davallar. Les plantes de cogeneració haurien de ser substituïdes dins del sistema per noves plantes de cicles combinats amb hidrogen.

Com a complement imprescindible, s'haurà de dotar al sistema d'acumuladors electroquímics (bateries) i les centrals reversibles de bombeig, que no són instal·lacions de generació sinó sistemes d'emmagatzematge d'energia elèctrica. Ambdues requereixen electricitat en períodes vall, és a dir, quan la producció d'electricitat, principalment renovable, supera la demanda, i la retornen en períodes punta. Atès que durant el procés es perd energia, apareixen en els balanços amb saldo negatiu equivalent al seu rendiment, és a dir, a la diferència entre l'energia absorbida i l'energia entregada.

Aquests sistemes d'emmagatzematge, com s'ha exposat anteriorment, són fonamentals per l'aprofitament total de l'energia renovable produïda i la producció d'hidrogen i sense elles, qualsevol dels escenaris que es proposaran a continuació serien inviables. Es considera que aquests sistemes d'emmagatzematge funcionaran 3.000 h/any, absorbint energia elèctrica del sistema i 3.000 h/any retornant-la i la potència instal·lada necessària vindrà donada, en cada cas, per la potència necessària per arribar a la potència ferma necessària.

A part de l'equipament esmentat, serà necessari disposar d'una capacitat mínima d'interconnexió amb els territoris veïns que disposin de potència ferma per protegir el sistema de perturbacions i per mantenir la freqüència. Aquesta potència mínima d'interconnexió es xifra en, com a mínim, 10 GW l'any 2050.

Pel que fa als electrolitzadors, es considerarà com a hipòtesi que durant els períodes de màxima demanda d'electricitat no es produirà hidrogen. És a dir, els electrolitzadors funcionaran bàsicament en les hores de pla i vall, aprofitant els excedents d'energia i potència disponibles en cada moment i, per tant, contribuiran a la regulació del sistema. Aquest sistema de funcionament té les seves limitacions que més endavant veurem.

Per determinar la potència ferma d'un sistema, és necessari analitzar la seva corba monòtona de càrrega, que és la representació de la demanda

en un període determinat ordenada de major a menor. En ella s'hi poden veure el nombre d'hores en què s'assoleix un determinat nivell de potència.

Per dotar el sistema de la potència ferma necessària, s'ha de dotar al sistema de com a mínim el valor màxim de la seva monòtona, com es pot veure en la figura.

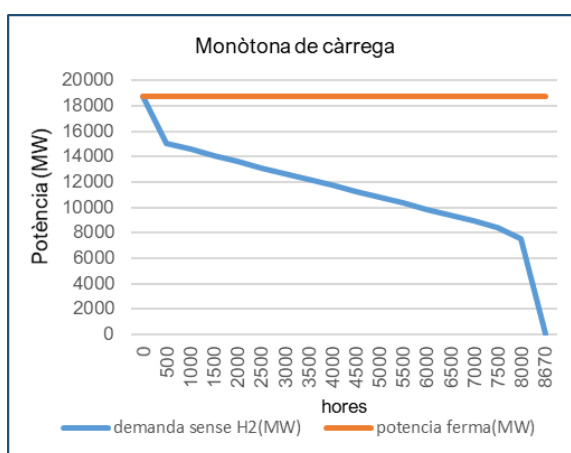


Figura 5. Monòtona de càrrega típica

Malgrat que no s'han considerat en aquest estudi, també hem de citar els sistemes anomenats CCUS, que són la captura, utilització i emmagatzematge de CO₂, que és una tecnologia important de reducció d'emissions que es pot aplicar a tot el sistema energètic i industrial⁹.

Caldria fer una crida d'atenció al fet que el procés de substitució dels sistemes de producció d'energia elèctrica amb combustibles fòssils per sistemes d'energia renovable ens allibera de les emissions de gasos d'efecte hivernacle però ens fa ostarages d'una sèrie de minerals i materials crítics, que tenen l'obtenció i producció concentrades en parts molt concretes del món i la mineria dels quals és altament contaminant en alguns dels casos (es parla més abastament d'aquest tema en l'annex 5).

⁹ Segons la IEA (Agència Internacional de l'Energia) "els objectius climàtics reforçats i els nous incentius a la inversió estan donant un impuls sense precedents a la CCUS, amb plans per a més de 100 noves instal·lacions anunciades el 2021. Les tecnologies CCUS tindran un paper important per assolir els objectius nets zero, inclosa com una de les poques solucions per fer front a les emissions de la indústria pesada i eliminar el CO₂ de l'atmosfera".

6.3 Escenari creixent: necessitats de potència elèctrica autoproduït tot l'hidrogen

En aquest escenari s'analitza com cobrir la demanda elèctrica que es deriva de l'escenari creixent produït tot l'hidrogen necessari a Catalunya amb fonts renovables.

Catalunya té en l'actualitat una demanda d'energia elèctrica d'uns 44 TWh/any, una potència màxima de demanda de 7,7 GW, i una potència ferma, garantida mitjançant energia nuclear (3 GW), energia tèrmica amb cicles combinats i cogeneració (4,5 GW) i energia hidroelèctrica (2,5 GW) amb un total de 10 GW.

La demanda d'energia, l'any 2050, com hem vist abans, serà de 269 TWh i per cobrir-la, sabent que tenim una limitació en la instal·lació de potència eòlica, necessitaríem l'aportació de les diferents tecnologies que es mostren a la taula 7 següent.

Evolució generació elèctrica

TWh	2020	2030	2040	2050
hidràulica	5.135	5.134	5.134	5.134
eòlica	2.556	22.360	44.010	65.200
fotovoltaica	380	39.380	84.370	153.400
altres renovables	449	449	449	449
nuclear	23.887	8.000	0	0
cicle combinat gas	5.263	6.600	7.000	0
cogeneració	5.112	5.112	2.000	0
cicle combinat H ₂	0	0	6.000	26.250
Total energia generada	42.782	87.036	148.964	250.434
saldo bateries	0	-1.500	-3.000	-6.000
saldo bombeig reversible	-151	-1.800	-3.600	-1.200
Generació neta	42.631	83.736	148.364	269.484
Demanda	44.000	80.486	147.227	269.311
Importació	1.369			
Saldo resultant		3.250	1.137	172
Emissions de CO₂ (Mt)	3,8	4,2	3,0	0,0

Taula 7. Evolució generació elèctrica a Catalunya vs. escenari demanda conservador

Amb aquestes premisses i les hipòtesis de l'apartat anterior, caldria instal·lar les següents potències de cada tecnologia:

Evolució parc de generació

MW	2020	2030	2040	2050
hidràulica	1.922	1.922	1.922	1.922
eòlica	1.271	7.500	15.000	20.000
fotovoltaica	282	30.282	64.900	118.000
altres renovables	179	211	211	211
nuclear	3.033	1.000	0	0
cicle combinat gas	3.788	3.000	1.000	0
cogeneració	974	974	400	0
cicle combinat H ₂	0	0	1.500	5.000
bateries	0	2.000	4.000	8.000
bombeig/turbinat	440	2.000	4.000	6.000
Total potència instal·lada	11.890	48.890	92.933	159.133
Total potència ferma	8.544	9.143	11.760	17.742
Potència demandada	7.719	5.670	8.929	13.448
Saldo potència	824	3.473	2.831	4.294

Taula 8. Evolució parc generació elèctrica a Catalunya. Escenari conservador full H₂

Es pot veure que la potència demandada l'any 2050 seria només de 13,5 GW, atès que la potència d'electròlisi, que com hem dit, es desconnectaria del sistema en punta, seria de 33,8 GW. Encara que la solució pugui semblar compatible, el fet de tenir una potència demandada sense producció d'hidrogen d'uns 13,5 GW als que hauríem d'acoblar i desacoblar 33,8 GW, ho fa inviable. Perquè un sistema elèctric sigui gestionable, la potència d'ajust no pot ser, en cap cas, superior a la potència demandada i ha de tenir valors compresos entre la potència ferma i la potència demandada.

Es pot pensar en una solució en què la potència necessària per produir hidrogen fos independent del sistema de generació per cobrir la demanda tradicional, però llavors, o bé se la dota de potència ferma per aprofitar els excedents, o bé el temps mitjà de funcionament dels electrolitzadors no seria de 5.000 h/any com hem considerat, sinó de 2.200 i caldrien més de 70

GW de potència d'electròlisi, solució que no és, en cap cas, assumible.

En conseqüència, podem determinar que aquesta solució no és pas viable però la seva demanda no és pas descartable i, en cas de donar-se, hi hauria dues possibilitats. La primera, que ja hem rebutjat: ser elèctricament dependents d'importacions d'energia de la resta d'Espanya o de França, sempre que poguessin assegurar potència ferma; i la segona, optar perquè una part de l'hidrogen necessari es produeixi fora de Catalunya i s'importi¹⁰.

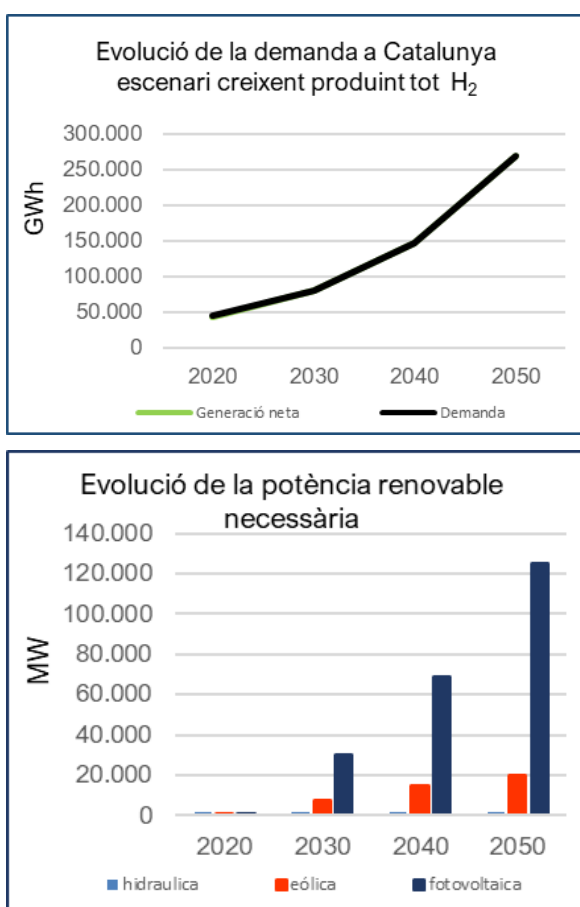


Figura 4. Evolució de la demanda i generació elèctrica en l'escenari conservador

Considerarem aquesta darrera opció com l'única viable, ja que l'opció d'importar tot l'hidrogen tampoc sembla adequada ja que Catalunya seria, com ara passa amb el gas natural, totalment

depenent d'un vector energètic que, d'aquí a uns anys, esdevindrà estratègic i, en conseqüència, continuarem l'estudi analitzant les necessitats de potència, produint únicament la meitat de l'hidrogen demandat, en els tres escenaris que estem desenvolupant.

6.4 Necessitats de potència elèctrica important part de l'hidrogen

Si es decideix importar part de l'hidrogen necessari per suplir la demanda tèrmica amb combustibles fòssils o fer servir altres mètodes per produir-lo¹¹, la demanda d'electricitat, com hem vist abans, es redueix considerablement.

Evolució generació elèctrica				
GWh	2020	2030	2040	2050
hidràulica	5.136	5.136	5.136	5.136
eòlica	2.556	22.360	44.010	65.200
fotovoltaica	380	27.085	59.345	107.900
altres renovables	449	449	449	449
nuclear	23.887	8.000	0	0
cicle combinat gas	5.263	7.000	1.000	0
cogeneració	5.112	5.112	1.200	0
cicle combinat H ₂	0	0	5.500	8.000
Total energia generada	42.783	75.143	116.640	186.685
saldo bateries	0	-3.000	-5.625	-7.500
saldo bombeig reversible	-151	-480	-900	-1.200
Generació neta	42.632	71.663	115.615	185.985
Demanda	44.000	71.059	114.760	185.336
Importació	1.368			
Saldo resultant		603	855	649
Emissions de CO₂ (Mt)	3,8	4,3	0,8	0,0

Taula 9. Evolució generació elèctrica a Catalunya. Escenari creixent ½ H₂

En els tres escenaris analitzats es tindrà en compte que s'importa la meitat de l'hidrogen necessari:

a) Escenari creixent

En aquest supòsit la demanda és de 185 TWh i, com es pot veure en la taula, la generació permetria cobrir la demanda amb un saldo lleugerament exportador a partir de 2030.

¹⁰ Aquesta solució d'importar hidrogen és la que ha anunciat recentment Alemanya per al seu sistema energètic i industrial.

¹¹ Aquesta seria una altra possibilitat que no tindrem en compte en aquest apartat, però que comentarem més endavant quan analitzem el sector petroquímic.

Evolució parc de generació

MW	2020	2030	2040	2050
hidràulica	1.922	1.922	1.922	1.922
eòlica	1.271	7.500	15.000	20.000
fotovoltaica	282	25.000	45.650	83.000
altres renovables	179	211	211	211
nuclear	3.033	1.000	0	0
cicle combinat gas	3.788	2.000	1.000	0
cogeneració	974	974	400	0
cicle combinat H ₂	0	0	2.500	5.000
bateries	0	4.000	6.000	10.000
bombeig/turbinat	440	2.400	4.500	6.000
Total potència instal·lada	11.890	45.008	77.183	126.133
Total potència ferma	8.544	10.071	13.685	19.282
Potència demandada	7.719	9.463	13.647	18.767
Saldo potència	824	608	38	515

Taula 10. Evolució parc generació elèctrica a Catalunya. Escenari creixent ½ H₂

Per assolir aquesta generació es manté la necessitat d'instal·lar 20 GW d'energia eòlica, es manté també la necessitat de disposar de sistemes que dotin al sistema de potència ferma.

Cal destacar que, a més de la potència renovable, s'hauran d'instal·lar fins a 10 GW de bateries d'emmagatzematge, incrementar la potència de centrals reversibles fins als 6 GW i dotar al sistema de centrals de cicle combinat amb hidrogen fins a 5 GW a 2050 per tal d'assolir, també, el requeriment de garantia de potència ferma que faran que la solució sigui vàlida. i per altra banda es podria rebaixar l'objectiu d'instal·lació de potència fotovoltaica fins als 83¹²GW, com es pot veure en la taula següent:

Pel que fa a la producció d'energia elèctrica per obtenir hidrogen, en aquest escenari s'avalua en 85 TWh amb una potència dels electrolitzadors de 17 GW. Tal com s'ha indicat abans, la ràtio de potència entre la demanda elèctrica i la dels electrolitzadors fa que el seu funcionament en hores pla i vall, evitant les hores de punta, sigui factible. Aquesta forma de funcionament permet evitar sobredimensionar la potència instal·lada.

b) Escenari constant

En aquest cas, la demanda d'energia elèctrica se situa en 159 TWh el 2050 i la cobertura de la mateixa és la que es mostra en la taula següent:

Evolució generació elèctrica				
GWh	2020	2030	2040	2050
hidràulica	5.136	5.136	5.136	5.136
eòlica	2.556	20.644	40.196	65.200
fotovoltaica	380	25.826	56.547	82.550
altres renovables	449	449	449	449
nuclear	23.887	8.000	0	0
cicle combinat gas	5.263	4.500	0	0
cogeneració	5.112	5.112	2.000	0
cicle combinat H ₂	0	0	4.000	10.500
Total energia generada	42.783	69.667	108.328	163.835
saldo bateries	0	-1.688	-5.063	-6.750
saldo bombeig reversible	-151	-600	-900	-1.200
Generació neta	42.632	67.380	102.365	155.885
Demanda	44.000	66.970	101.931	155.143
Importació	1.368			
Saldo resultant		410	434	742
Emissions de CO₂ (Mt)	3,8	3,6	0,8	0,0

Taula 11. Evolució generació elèctrica a Catalunya vs. escenari demanda constant ½ H₂

S'agafarà com a supòsit que es manté la potència eòlica instal·lada en el seu màxim tècnic de 20 GW, cosa que permet, per cobrir la demanda, reduir la potència fotovoltaica fins als 63,5 GW i la capacitat d'emmagatzematge en bateries fins als 9 GW, i en garanteix així la potència ferma. A continuació es presenten els requeriments de potència per assolir la cobertura de demanda mostrada en la taula anterior.

¹² Per instal·lar-los caldria una superfície aproximada d'unes 63.000 ha, la qual cosa no representa un topall tècnic. Com a referència, això és aproximadament el 2% de la superfície de Catalunya, el 3% de la superfície forestal o el 30% de la superfície urbanitzada.

MW	Evolució parc de generació			
	2020	2030	2040	2050
hidràulica	1.922	1.922	1.922	1.922
eòlica	1.271	6.850	15.000	20.000
fotovoltaica	282	21.749	43.498	63.500
altres renovables	179	211	211	211
nuclear	3.033	1.000	0	0
cicle combinat gas	3.788	3.000	1.000	0
cogeneració	974	974	400	0
cicle combinat H ₂	0	0	2.000	5.000
bateries	0	2.250	6.750	9.000
bombeig/turbinat	440	3.000	4.500	6.000
Total potència instal·lada	11.890	40.956	75.281	105.633
Total potència ferma	8.544	10.060	13.802	18.512
Potència demanda	7.719	9.324	12.471	15.540
Saldo potència	824	736	1.331	2.972

Taula 12. Evolució parc generació elèctrica a Catalunya. Escenari constant ½ H₂

Pel que fa a la producció d'energia elèctrica per obtenir hidrogen, en aquest escenari s'avalua en 72 TWh amb una potència dels electrolitzadors de 14 GW. Tal com s'ha indicat abans, la ràtio de potència entre la demanda elèctrica i la dels electrolitzadors fa que el seu funcionament en hores pla i vall, evitant les hores de punta, sigui factible. Aquesta forma de funcionament permet evitar sobredimensionar la potència instal·lada.

c) Escenari decreixent

GWh	Evolució generació elèctrica			
	2020	2030	2040	2050
hidràulica	5.136	5.136	5.136	5.136
eòlica	2.556	20.776	40.489	65.200
fotovoltaica	380	20.320	46.644	67.600
altres renovables	449	449	449	449
nuclear	23.887	8.000	0	0
cicle combinat gas	5.263	7.500	650	0
cogeneració	5.112	5.112	2.000	0
cicle combinat H ₂	0	0	2.000	4.000
Total energia generada	42.783	67.293	97.368	142.385
saldo bateries	0	-1.950	-3.169	-4.875
saldo bombeig reversible	-151	-360	-630	-900
Generació neta	42.632	64.983	93.570	136.610
Demanda	44.000	63.951	92.947	135.092
Importació	1.368			
Saldo resultant		1.033	622	1.519
Emissions de CO₂ (Mt)	3,8	4,5	1,0	0,0

Taula 13. Evolució generació elèctrica a Catalunya vs. escenari demanda decreixent ½ H₂

Finalment analitzarem els requeriments de potència per cobrir les demandes de l'escenari decreixent que, recordem, se situava en 135 TWh l'any 2050.

En aquest cas, com que la implantació de potència renovable és menys intensa que en els escenaris anteriors, es precisa una major aportació d'energia elèctrica produïda pels cicles combinats l'any 2030.

En contrapartida, a partir de l'any 2040, les centrals de cicle combinat amb hidrogen donen potència ferma al sistema però gairebé no aporten energia. És a dir, romanen com a back up de reserva però són imprescindibles per garantir el subministrament. També, els requeriments de potència fotovoltaica es redueixen a 52 GW l'any 2050 però cal mantenir una important potència ferma de bateries i bombeig.

Pel que fa a la producció d'energia elèctrica per obtenir hidrogen, en aquest escenari s'avalua en 60 TWh amb una potència dels electrolitzadors de 12 GW. Tal com s'ha indicat abans, la ràtio de potència entre la demanda elèctrica i la dels electrolitzadors fa que el seu funcionament en hores pla i vall, evitant les hores de punta, sigui factible. Aquesta forma de funcionament permet evitar sobredimensionar la potència instal·lada.

MW	Evolució generació elèctrica			
	2020	2030	2040	2050
hidràulica	1.922	1.922	1.922	1.922
eòlica	1.271	6.900	15.000	20.000
fotovoltaica	282	17.043	35.880	52.000
altres renovables	179	211	211	211
nuclear	3.033	1.000	0	0
cicle combinat gas	3.788	3.000	1.000	0
cogeneració	974	974	400	0
cicle combinat H ₂	0	0	2.000	4.000
bateries	0	2.600	4.225	6.500
bombeig/turbinat	440	1.800	3.150	4.500
Total potència instal·lada	11.890	35.451	63.788	89.133
Total potència ferma	8.544	9.409	10.819	14.512
Potència demanda	7.719	9.365	10.497	13.670
Saldo potència	824	44	321	842

Taula 14. Evolució parc generació elèctrica a Catalunya. Escenari decreixent ½ H₂

6.5 Comparativa de resultats

A continuació es presenten les dades més significatives en els tres escenaris:

Any 2050 dades en MW	Taula comparativa		
	Creixent	Constant	Decreixent
Potència renovable	103.000	83.500	72.000
eòlica	20.000	20.000	20.000
fotovoltaica	83.000	63.500	52.000
Potència ferma	21.000	20.000	15.000
cicle combinat H ₂	5.000	5.000	4.000
bateries	10.000	9.000	6.500
bombeig/turbinat	6.000	6.000	4.500
Potència electròlisi	17.000	14.400	12.000
dades en Mt			
Necessitats H₂	3	2,6	2,2
Importació H ₂ ¹³	1,5	1,3	1,1

Taula 15. Dades significatives en els escenaris de producció elèctrica important ½ H₂

Dels resultats obtinguts, se'n conclou que:

1. L'escenari decreixent és l'opció menys exigent des del punt de vista de necessitats d'infraestructures i d'inversió, però és la que requereix una major implicació dels clients en forma d'estalvi i d'optimització d'instal·lacions. Per tant, a nivell institucional, s'haurien d'activar tots els mecanismes que permetin millorar l'estalvi d'energia i la intensitat energètica amb la finalitat que la demanda se situï el més a prop possible d'aquest escenari.
2. Catalunya haurà d'instal·lar una potència renovable compresa entre els 72 (escenari decreixent) i els 103 (escenari creixent) GW l'any 2050, dels quals la major part haurien de ser fotovoltaics i 20 GW, que recordem és el màxim tècnic de Catalunya, haurien de ser eòlics. Això vol dir que, inclús en l'escenari més favorable, s'haurien d'instal·lar de forma continuada 2,6 GW/any, o el que és el mateix, 7 MW de potència renovable cada dia durant els propers 28 anys.
3. Tanmateix, s'haurà de dotar d'un mínim de potència ferma, imprescindible perquè la generació elèctrica renovable funcioni, al voltant dels 20 GW i mai inferior als 15 GW.

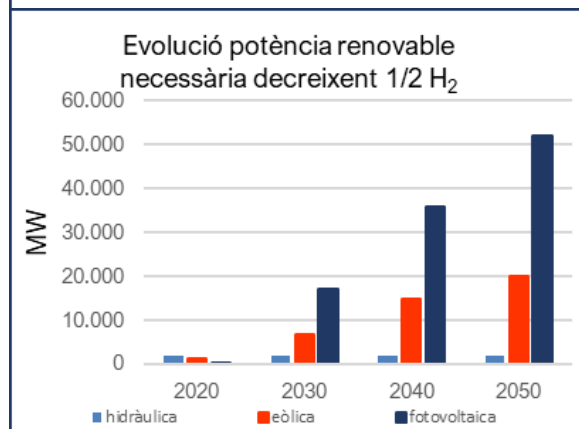
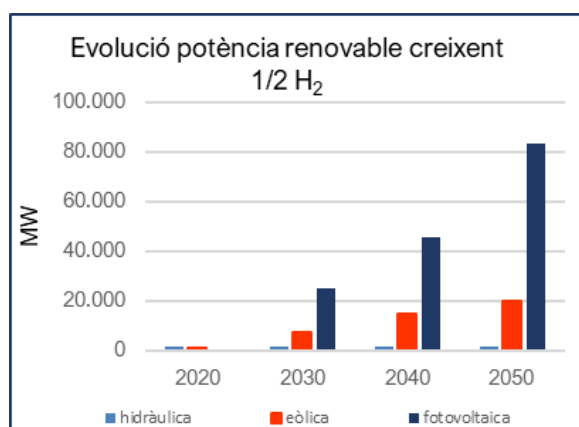
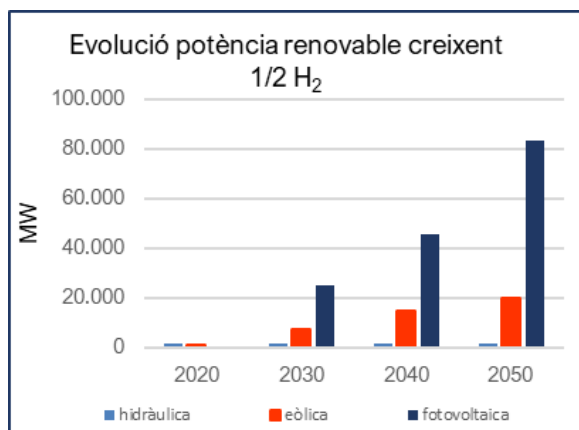


Figura 5. Comparació de la potència renovable necessària ½ H₂

¹³ L'any 2050 s'espera que l'eficiència dels electrolitzadors sigui del 80% i que amb 17 GW es produïrien 1,7 Mt H₂/any. Com que aquesta fita encara no està assolida, hem agafat el rendiment actual del 70% per la qual cosa la producció és, només, d'1,5 Mt H₂/any.

Aquesta potència ferma es composaria de bateries d'acumuladors (entre 6,5 i 10 GW) més centrals reversibles bombeig/turbinat (al voltant dels 6 GW) i s'haurien de transformar els cicles combinats i les cogeneracions en plantes de producció d'electricitat amb hidrogen (5 GW addicionals).

4. Malgrat tot, per garantir el subministrament, s'haurien de potenciar les interconnexions elèctriques amb àrees geogràfiques limítrofes que disposin de disponibilitat de potència ferma. Aquestes interconnexions, a més de permetre l'intercanvi d'energia, tenen com a finalitat protegir el sistema d'una fallida en el sistema de generació. La UE recomana dimensionar aquestes interconnexions amb un valor del 10% de la potència instal·lada i nosaltres considerarem necessari disposar d'un mínim de 10 GW l'any 2050, per prevenir contingències i garantir la freqüència del sistema.
5. Una bona part de l'energia elèctrica produïda es dedicarà, especialment a partir de 2035, a la producció d'hidrogen verd. Per tant, caldrà instal·lar plantes d'electròlisi, amb una potència d'entre 12 i 17 GW i connectar-les amb la xarxa general de transport elèctric. En la determinació de la potència ferma no s'han tingut en compte aquestes potències.
6. A partir de 2030, s'hauria d'iniciar el procés de dotació d'infraestructures per la importació d'hidrogen en quantitats significatives i crear-se dos centres de recepció interconnectats als ports de Barcelona i Tarragona. El desenvolupament d'aquests dos darrers punts els veurem en el següent apartat.
7. La xarxa de transport elèctric haurà de patir modificacions substancials amb la finalitat de poder vehicular cap als punts de consum l'energia produïda de forma centralitzada en els parcs solars, les plantes fotovoltaïques centralitzades o emmagatzemada en centrals reversibles de bombeig i plantes de bateries electroquímiques. Tanmateix, la xarxa elèctrica de distribució haurà de canviar radicalment la seva concepció i explotació de forma que els fluxos puguin ser en tots dos sentits i els consumidors, sense excepcions, es converteixen en prosumers.

6.6 L'hidrogen com a solució a la demanda tèrmica

Com s'ha anat exposant al llarg del document, el gran repte per assolir una economia exempta de carboni passa per trobar un substitut als combustibles fòssils en els processos tèrmics industrials i com a matèria primera de sectors clau com el petroquímic.

Sembla que aquest substitut podria ser l'hidrogen, però encara és una incògnita que pugui arribar a ser-ho en les quantitats demandades i els nivells de preus necessaris.

Atès que s'ha demostrat que Catalunya no disposa de recursos per produir tot l'hidrogen que necessitaria l'any 2050, es considera com a hipòtesis la importació de part d'aquest que esdevindrà un combustible fonamental a la indústria a partir de 2035.

L'hidrogen es pot transportar i emmagatzemar comprimit o líquid, o bé mitjançant productes químics intermedis que es poden revertir per recuperar l'hidrogen com és el cas de l'amoníac i del metilciclohexà/tolué, entre d'altres.

S'està considerant, també, com a hipòtesi que tot l'hidrogen produït a Catalunya serà hidrogen verd, és a dir, produït per electròlisi a partir d'energia elèctrica renovable.

La producció d'hidrogen verd requereix una sèrie de condicionants que es podrien resumir en: proximitat d'una línia d'alta tensió amb potència suficient, proximitat d'una font de proveïment d'aigua i sistemes de trasllat de l'hidrogen fins als punts de consum.

La producció d'hidrogen mitjançant electròlisi, a més, té varis reptes a assolir els propers anys: millorar l'eficiència del procés que s'hauria de situar per sobre del 80%, reduir el cost d'inversió fins situar-lo per sota dels 300 €/kW, allargar la vida útil dels electrolitzadors que ara se situa al voltant de les 60.000 h fins a, com a mínim, les 100.000 h i fer que els equips puguin treballar amb qualitats d'aigua inferiors a les actuals (totalment desmineralitzades) o inclús amb aigua de mar.

És possible que certs països amb un elevat parc de potència nuclear facin servir els seus excedents per produir hidrogen, que igual que el verd, estarà exempt d'emissions de gasos d'efecte hivernacle i s'hauria de decidir si seria lícita, o no, la compra d'aquest hidrogen. S'ha de tenir en compte que la producció d'hidrogen a partir de centrals nuclears es pot fer tant mitjançant electròlisi, aprofitant l'energia elèctrica produïda per la central, com per termòlisi, aprofitant les altes temperatures que s'assoleixen en els reactors, amb la qual cosa l'eficiència del procés, sumant totes dues vies, serà molt elevada i el preu final d'aquest hidrogen pot ser molt competitiu.

A més, la indústria petroquímica, en el seu procés de transformació, basarà els seus processos productius en el mètode de Fisher-Tropsch, és a dir, fusionant molècules de diòxid de carboni i hidrogen per obtenir hidrocarburs. L'obtenció d'hidrogen a partir de biogàs allibera CO₂ neutre en emissions que demandaran les refineries i, per tant, s'hauran de tenir en compte també els processos de reformat de biometà en els balanços de producció d'hidrogen i potser, en el futur, els de segrest de diòxid de carboni de l'atmosfera per fer-ho servir com a matèria primera de la nova petroquímica.

Com hem vist en l'anàlisi de demanda, Catalunya precisaria, l'any 2.050, 10.856 ktep d'hidrogen en l'escenari creixent i 7.746 ktep en l'escenari decreixent. Si, com hem acordat, només la meitat d'aquest hidrogen es produeix a Catalunya, es precisaran respectivament (veure taules 4 i 5) 84 TWh i 60 TWh. Arribats a aquest punt, hem de tornar a parlar de potència ferma ja que si consideréssim que la producció d'hidrogen es duria a terme, només, quan hi hagués producció renovable es tindrien 1.610 h útils/any en l'escenari creixent (amb més potència renovable instal·lada) i 1.736 h útils/any en l'escenari decreixent i, en conseqüència, caldria instal·lar una potència d'electròlisi que seria de l'ordre dels 50 GW en els dos supòsits que seria totalment inabastable.

Per tant, per produir hidrogen de forma massiva cal abans aplanar la corba demanda o, el que és el mateix, fer que la monòtona de consum tingui

una zona plana el més extensa possible. Si s'aconseguís que aquesta zona plana arribés a les 5.000 h/any caldria instal·lar entre 12 i 17 GW d'electrolitzadors en funció de l'escenari.

Caldrà tenir en compte també el preu a què es pot produir aquest hidrogen i on el cost de capital serà un factor important. Si l'alimentació dels electrolitzadors es fes, per exemple, amb centrals nuclears dedicades, com probablement faran països veïns al nostre, la potència instal·lada es veuria reduïda a només 10 GW aproximadament en l'escenari creixent.

Un altre aspecte a tenir en compte és el consum d'aigua. Per produir 1 kg d'hidrogen (33,3 kWh) calen 9 l d'aigua. Per tant, per produir entre 1,1 i 1,5 Mt H₂ caldran entre 10 i 14 hm³ d'aigua. El consum d'aigua de Catalunya l'any 2019 va ser¹⁴ de 689 hm³ i, per tant, suposa entre un 1,5% i un 2% d'aquesta demanda. Si aquesta aigua s'hagués d'obtenir a partir d'aigua de mar mitjançant osmosis caldrien 5 kWh per cada m³ produït i la demanda d'energia s'incrementaria en 0,12 TWh/any.

6.7 Importació d'hidrogen

Com s'ha comentat caldrà importar entre 1,1 i 1,5 Mt de H₂ (3.730 i 5.095 ktep) en funció dels escenaris.

El transport d'hidrogen és, potser, la part que cal desenvolupar per facilitar la seva logística que complica la seva baixa densitat (1 m³ d'hidrogen pesa, en condicions normals de pressió i temperatura, tan sols 80 g). Hi ha diverses formes de transportar hidrogen: líquid; en forma d'amoníac que es pot utilitzar directament per alguns usos o es torna a dissociar en H₂ i N₂ en destí; mitjançant fluids portadors orgànics com el metilciclohexà/toluè, etc.

Cadascuna d'aquestes tecnologies té dificultats:

- El transport d'hidrogen criogènic es fa a, només, 20 K (-253 °C), és a dir, molt a prop del zero absolut de temperatura i precisa de materials molt específics per poder suportar aquestes temperatures. A més, els dipòsits criogènics precisen d'una estructura de buit per evitar el flux de calor que afavoriria la

14 Font: Inescat.

ràpida evaporació de l'hidrogen i, tot i així, presenten un boil-off del 0,3% diari. Des del punt de vista d'eficiència, el procés de liquació consumeix el 30% de l'energia continguda en l'hidrogen.

- El transport d'amoniac és més conegut. Es pot transportar en estat líquid a pressió atmosfèrica mantenint-lo a una temperatura inferior als 239 K (-34 °C) o inclús en estat sòlid refredant-lo per sota dels 194 °K (-79 °C). El procés de transformació d'hidrogen en amoniac i la descomposició de la molècula per obtenir altra vegada hidrogen és ineficient i es pot perdre fins al 36% de l'energia continguda amb l'hidrogen. A més, l'amoniac és altament inflamable en concentracions d'entre el 15 i el 28% en aire. L'amoniac també es pot utilitzar com a base dels fertilitzants i altres finalitats a la indústria.
- L'emmagatzematge a pressió és una tecnologia coneguda i segura però no és aplicable per vehicular grans quantitats d'hidrogen.
- Finalment, l'ús de líquids orgànics implica "carregar" amb hidrogen les molècules d'un portador, transportar-lo i extreure'n l'hidrogen al destí. El portador ha de ser un líquid fàcil de transportar. La càrrega del portador amb hidrogen i la descàrrega posterior requereixen entre el 35 i el 40% de l'energia continguda a l'hidrogen. L'opció de menys cost entre les possibles és la del metilciclohexà/toluè. Després de la descàrrega, el portador ha de ser tornat a transportar a l'origen per repetir el procés, cosa que l'encareix. La disponibilitat d'aquesta opció requereix encara esforços considerables fins a assolir la disponibilitat comercial de la mateixa.

Com que encara no està clar quina d'aquestes tecnologies serà dominant en el futur, de cara a aquest estudi considerarem l'opció de la liquació pel dimensionament de les capacitats necessàries però sense poder afirmar que serà aquesta la tecnologia que finalment es durà a terme.

El primer a tenir en compte és que el gas natural liqua a -160 °C i l'H₂ a -253 °C per la qual cosa és molt poc probable que els acers que s'utilitzen en l'actualitat, tant en els dipòsits dels metaners com els de les terminals de regasificació, siguin vàlids i s'hauran de refer quasi totalment. El mateix succeiria en les altres dues opcions, en què s'haurien de construir plantes ad hoc.

La planta de regasificació de Barcelona té una capacitat d'emmagatzematge de 700.000 m³ (amb quatre dipòsits criogènics de 150.000 m³ i dos de 50.000 m³, equivalents a 5,2 TWh (447 ktep). Atès que a igualtat de volum 1 m³ de GNL té un poder calorífic de 7,44 MWh en tant que 1 m³ de H₂ té un poder calorífic de 2,36 MWh, la planta de Barcelona podria emmagatzemar 1,7 TWh (142 ktep) o 43 kt de H₂.

És a dir, en funció de l'escenari i comptant que, pel motiu que fos, no es rebessin nous carregaments, la planta plena podria garantir el subministrament d'hidrogen de Catalunya només durant cinc dies.

Amb aquestes xifres seria convenient incrementar la capacitat d'emmagatzematge amb una nova planta al Port de Tarragona de capacitat, com a mínim, de la meitat que la del Port de Barcelona. Aquesta planta, en cas de contingència permetria alimentar la indústria petroquímica i garantir el subministrament i la planta de Barcelona es podria dedicar a abastir la resta del sector industrial de Catalunya¹⁵.

En el que fa referència a la utilització del sistema de gasoductes per vehicular hidrogen és possible que els acers precisin algun tipus de tractament intern i serà necessari substituir els elements auxiliars de les xarxes i alguns trams de xarxa però la capacitat de vehicular energia seria quasi similar a l'actual, ja que els índexs de Wobbe del gas natural i l'hidrogen són molt similars. Si bé el poder calorífic per unitat de volum és tres vegades inferior en el cas de l'hidrogen, el cabal vehiculat, en funció de la seva baixa densitat i del seu factor de compressió, pot ser quasi tres vegades superior al del gas natural, cosa que compensa el factor anterior. Això sí, la velocitat de pas per les canonades serà superior a l'actual.

¹⁵ Alemanya acaba d'anunciar la construcció d'una planta receptora d'hidrogen que permetrà rebre 6 Mt H₂ (250 TWh) l'any 2045 i comprometrà inversions per valor de 25.000 M€. El projecte s'emmarca dins de l'acord amb Aràbia Saudita mitjançant el qual aquest país estarà en disposició de subministrar-li 650 t H₂ verd/dia.

No s'ha contemplat la hipòtesi d'interconnectar Catalunya amb gasoductes portadors d'hidrogen amb altres àrees geogràfiques però, de la mateixa manera que es recomana amb les interconnexions elèctriques, seria convenient interconnectar la xarxa de distribució d'hidrogen catalana amb la resta d'Espanya, especialment amb Euskadi i Llevant, on hi plantes de regasificació i es podria establir corredors, i amb França.

6.8 Biometà

Com hem vist en l'apartat de necessitats d'energia primària, Catalunya necessita generar l'any 2050 entre 1.100 i 1.500 ktep de biometà i entre 650 i 900 ktep de biocombustibles.

El biometà s'hauria de dedicar a suplir les demandes de gas natural en els sectors domèstic i terciari aprofitant les infraestructures de distribució existents i ajudar a minimitzar la punta elèctrica.

En aquests sectors podem considerar que hi haurà una millora de l'eficiència considerable els propers anys i, per tant, la demanda s'hauria de situar més propera als 1.100 que als 1.500 ktep.

La Unió Europea va emetre un informe: *Impact of the use of the biomethane and hydrogen potential on trans-European infrastructure*, el setembre de 2018, en què xifrava el potencial de producció de biometà i syngas d'Espanya en 125 TWh (10.750 ktep) tan sols per darrere d'Alemanya i França. Podem considerar que el 20% d'aquest potencial se situa a Catalunya i, per tant, estaríem parlant d'un potencial de 25 TWh (2.150 ktep).

Si aquestes dades fossin certes, Catalunya estaria en disposició de cobrir les seves demandes de biometà per a ús domèstic i terciari i dedicar part dels excedents a la indústria petroquímica del futur que podria obtenir hidrogen i diòxid de carboni, els components bàsics dels seus processos de síntesi, lliures d'emissions.

Per aconseguir aquests objectius és necessari l'ús de dues tecnologies, la digestió anaeròbia de residus i subproductes orgànics biodegradables, i la gasificació tèrmica de residus i materials lignocel·lulòsics (d'origen forestal i agrícola).

De la primera s'obté biogàs, que es depura i s'enriqueix (upgrading) per obtenir biometà, i de la segona s'obté syngas, que es pot transformar en biometà o metà sintètic segons si s'utilitza un procés biològic o fisicoquímic. En aquests processos de transformació dels gasos primaris s'allibera diòxid de carboni, el qual es pot aprofitar in situ per transformar hidrogen verd en biometà o metà sintètic a fi d'injectar-lo a la xarxa de gas natural, fet que aporta flexibilitat al sistema de gasos renovables.

L'UE considera que de mitjana el 55,5% d'aquest biometà es podria generar amb biomassa agrícola, tant fems com cultius dedicats aprofitant els períodes de guaret dels camps de conreu. Un 25,9% tindria com a matèria primera residus forestals amb una adequada política de gestió dels boscos, un 8,7% s'obtidria de la gestió adequada dels residus sòlids urbans, un 7,8% de les restes de conreus com la palla, sarments de les vinyes, etc., i el 2,1% que resta del llots de depuradores d'aigües residuals.

Extrapolant les mitjanes anteriors a Catalunya no és immediat, ja que l'informe de la UE considera que del potencial de 125 TWh per Espanya, uns 55 TWh corresponen a cultius energètics. Si d'aquests se suposés un 20% produïts a Catalunya (11 TWh), molt probablement es crearia un conflicte amb la superfície agrícola actualment dedicada a l'alimentació, la qual cosa obliga a ser prudents a l'hora de fer projeccions de futur. No tant així amb la gestió de dejeccions ramaderes, fangs de depuradora, fracció orgànica de residus municipals i residus de la indústria alimentària per produir biogàs, o dels residus forestals i agrícoles, o de cultius energètics forestals, per produir syngas, on hi ha un ampli camí per explorar i recórrer.

Per a no ser excessivament optimistes extrapolant mitjanes europees, amb una superfície agrícola limitada i una superfície forestal amb orografia que en limita l'explotació, podria ser més realista un objectiu lleugerament menor a partir dels recursos indicats, però en aquest cas caldria complementar fins a 25 TWh amb biometà o metà sintètic produït a partir d'hidrogen verd.

¹⁶ Afortunadament el biometà i l'hidrogen són gasos bescanviables, ja que tots dos tenen índexs de Wobbe superiors similars i de l'ordre de 50 MJ/m³(n).

Per tant, és necessària, des de ja mateix, una reglamentació que obligui a tot propietari de residus a gestionar-los de manera adequada i a un desplegament de plantes de tractament de residus i producció de biogàs i syngas al territori, estratègicament situades, que faci que tothom en tingui una relativament a la vora i que es puguin programar rutes de recollida.

Aquestes plantes haurien de tenir una mida suficient per garantir un mínim d'eficiència i per cada una d'elles s'hauria d'estudiar la composició de residus òptima que pot gestionar per fomentar la codigestió i afavorir qualitats constants de biogàs, en el cas de residus biodegradables. També per a residus o cultius forestals i agrícoles estratègicament localitzades per minimitzar els costos de transport de la matèria primera i per facilitar la injecció del metà obtingut del syngas a la xarxa.

Com hem dit, el biometà obtingut després de sotmetre a un procés d'upgrading al biogàs s'utilitzaria per substituir el gas natural (de fet es pot barrejar amb ell sense cap tipus de limitació) en les xarxes que subministren clients domèstics i comercials. Això comportaria, en el futur, la segregació de l'actual xarxa en dues: una que bellugaria hidrogen i que alimentaria els clients industrials, i una altra destinada a vehicular biometà.

El sistema de producció / distribució de biometà hauria de disposar de dipòsits d'emmagatzematge (gasòmetres), aprofitar la capacitat de magatzem actual de la xarxa de gas en períodes de baixa demanda (nits i festius) i necessàriament hauran d'existir connexions entre les xarxes d'hidrogen i biometà per fer *blending*¹⁶, que permeti cobrir les puntes de demanda d'hivern afegint hidrogen al biometà i probablement injectant biometà a l'hidrogen a l'estiu, quan la demanda domèstica de gas decreix. O bé transformant el metà a hidrogen (reformat), o produint metà a partir de l'hidrogen i una font de diòxid de carboni, com l'obtingut de l'upgrading del biogàs o d'altres fonts.

Catalunya hauria d'assolir una producció de biometà o metà sintètic l'any 2030 de 5 TWh, 12,5 TWh l'any 2040 i 25 TWh l'any 2050.

7 Implantació del Pla - primer objectiu 2030

Per assolir l'objectiu que Catalunya sigui un territori descarbonitzat l'any 2050 s'han de complir una sèrie de fites intermèdies la primera de les quals tindrà lloc l'any 2030.

L'objectiu de reduir les emissions a 18 Mt CO₂ eq és pràcticament inabastable, ja que la generació d'energia elèctrica i ús de gas natural en la indústria generen 13 de les 31,5 Mt CO₂ emeses l'any 2019. Amb una implementació adient d'energies renovables que ara comentarem, es podrien reduir 2 Mt CO₂ en la generació d'electricitat però la indústria continuaria depenent del gas natural i mantindria les seves emissions.

Objectius potència generació elèctrica 2030

MW	creixent	decreixent
eòlica	7.500	6.900
fotovoltaica	25.000	17.000
bateries	4.000	2.600
bombeig/turbinat	2.400	1.800
nuclear	1.000	1.000
cicle combinat gas	2.000	3.000
cogeneració	974	974

Taula 16. Objectius de potència instal·lada 2030

Si analitzem les necessitats de potència elèctrica l'any 2030 en els dos escenaris extrems veurem que necessitem assolir entre 6,9 i 7,5 GW de potència eòlica instal·lada i un precisaria 17 GW i l'altre 25 GW d'energia fotovoltaica.

Això comporta instal·lar i posar en servei un generador eòlic de 6 MW cada dos dies de forma interrompuda des d'ara i fins 2030 i muntar i posar en servei entre 5,8 i 8,5 MW fotovoltaics cada dia.

A més, caldria instal·lar i tenir en servei un mínim de 4,4 GW d'emmagatzematge d'energia elèctrica en forma de bateries i de bombeig reversible. Si s'assolissin els objectius establerts, seria possible reduir la potència nuclear a tan sols 1 GW i la potència de

generació amb gas natural a 3 GW comptant cicles combinats i cogeneració.

Les emissions de gasos d'efecte hivernacle derivades de la generació elèctrica serien de l'entorn de 4 Mt CO₂ (similars a les registrades el 2020, any favorable en què la demanda elèctrica es va reduir substancialment a conseqüència de la covid) i només 2,5 Mt CO₂ inferior al 2019, ja que encara que la potència tèrmica es redueix, aquesta haurà de treballar més hores per suplir parcialment 16 TWh nuclears que es detrauran del sistema.

Per cada 3 GW que ens allunyem de l'objectiu d'instal·lació de potència renovable o d'emmagatzematge, s'haurà de mantenir 1 GW de potència convencional, bé nuclear, bé tèrmica convencional.

L'any 2030 la producció d'hidrogen serà encara poc significativa i se situaria a l'entorn dels 0,2 Mt H₂, el que voldria dir que s'hauria substituït la producció d'hidrogen gris (xifrada en 0,1 Mt H₂/any a Catalunya) per hidrogen verd i es podrien dedicar els altres 0,1 Mt al transport públic i/o de llarga distància. Per assolir-ho caldrà instal·lar 1,2 GW de potència d'electrolització.

La substitució de l'hidrogen gris per hidrogen verd comportaria l'estalvi d'1 Mt CO₂ i l'ús de 0,1 Mt H₂ en el transport permetrien substituir 330 Ml de gasoil¹⁷ que reduirien les emissions en 0,9 Mt CO₂ addicionals. Si la producció d'hidrogen fos més gran, es podria introduir a les xarxes de gas natural. Hi ha ja prou evidències científiques que la mescla d'hidrogen amb gas natural en certes proporcions és totalment factible. L'hidrogen produït a partir de recursos renovables o nuclears es pot injectar a les canonades de gas natural i la barreja pot ser utilitzada pels usuaris finals de gas natural per generar energia i calor.

Diversos projectes a tot el món estan demostrant la viabilitat de les barreges d'hidrogen amb gas natural fins a concentracions del 20%. El blending, per tant, pot ser una solució transitòria fins que hi hagi producció o importació d'hidrogen suficient per distribuir-ho directament als usuaris. Com hem comentat, la producció de biometà depèn únicament de la voluntat del govern d'or-

denar una sèrie de sectors: agrícola, ramader, gestió forestal, gestió de residus, etc., i establir els mecanismes i incentius que desenvolupin les plantes de metanització. És, sens dubte, l'exemple més clar d'economia circular que ens podem trobar i disposem dels recursos que, en molts casos són, a més, un problema. El potencial tècnic de Catalunya s'ha xifrat en 25 TWh i l'any 2030 s'haurien de produir i aprofitar un mínim de 5 TWh. La substitució de 5 TWh de gas natural per biometà estalviaria, de forma directa, 1 Mt CO₂ addicional i de forma indirecta podem estimar que un altre 1 Mt CO₂ de metà que es deixaria d'emetre en abocadors i explotacions ramaderes.

Com podem veure, la instal·lació de 30 GW de potència renovable té el mateix efecte sobre la reducció d'emissions que la introducció de 0,2 Mt H₂ en la indústria i el transport o la instal·lació de plantes de tractament de residus amb 650 MW de potència equivalent.

Per tant, és important eliminar l'hidrogen gris de forma progressiva, encara que l'haguem de produir temporalment amb electricitat nuclear, i potenciar la producció de biometà per desplaçar el gas natural, i ho és encara més quan els ritmes dels plans d'implantació d'energies renovables ja es preveu que seran molt difícils d'assolir en aquest període.

Objectius globals 2030

	creixent	decreixent
Potència renovable (MW)		
eòlica	7.500	6.900
fotovoltaica	25.000	17.000
bateries	4.000	2.600
bombeig/turbinat	2.400	1.800
H₂ verd o equivalent (Mt)		
Potència electrolitzador (GW)	1,7	1,5
Biometà (GWh)	5.000	5.000
Reducció d'emissions CO₂ (Mt)		
	6,75	6,5

Taula 17. Objectius globals a assolir l'any 2030

¹⁷ Factor d'emissió del gasoil d'automoció 2,708 kg CO₂/l. Font: MITERD

8 Aspectes econòmics i laborals

La transformació energètica de Catalunya precisarà d'unes inversions compreses entre els 230.000 i els 175.000 M€, cosa que vol dir invertir de l'ordre de 8.000 M€/any durant els propers 30 anys¹⁸.

Any 2050 dades en MW	Potència necessària			Inversió (M€)	
	Creixent	Decreixent	cost unitari (M€/MW)	Creixent	Decreixent
Potència renovable	103.000	72.000		129.600	92.400
eòlica	20.000	20.000	1,5	30.000	30.000
fotovoltaica	83.000	52.000	1,2	99.600	62.400
Potència ferma	21.000	15.000		31.500	22.500
cicle combinat H ₂	5.000	4.000	2	10.000	8.000
bateries	10.000	6.500	2,5	25.000	16.250
bombeig	6.000	4.500	2,5	15.000	11.250
Interconnexions elèctriques	10.000	10.000	2	20.000	20.000
Desenvolupament H₂				23.000	18.000
Potència electrolitzadors	15.000	10.000	1	15.000	10.000
Planta H ₂ Tarragona				5.000	5.000
Adequació planta Barcelona				3.000	3.000
Potència biometà	3.500	3.500	3	5.250	5.250
Total parcial				209.350	158.150
Adequació infraestructures i Imprevistos				20.935	15.815
Total				230.285	173.965

Taula 18. Avaluació econòmica de la transició energètica

En relació amb l'ocupació i segons dades de la Cambra de Comerç¹⁹, el pla donaria feina de qualitat i de forma sostinguda els propers trenta anys a una forquilla de 125.000 i 160.000 tècnics de diferents nivells de capacitació.

¹⁸ Per posar-ho en context, equivaldria a un terç del pressupost de Catalunya de l'any 2022.

¹⁹ Les ràtios d'ocupació oscil·len entre els 10 i els 36 tècnic-any/MW en funció de la tecnologia.

9 Comparativa de l'estudi amb la *PROENCAT*

La Generalitat de Catalunya va publicar, el febrer de 2022, la seva prospectiva per assolir la transició energètica cap a un model energètic basat 100% en energies renovables al 2050, denominat *PROENCAT*.

La *PROENCAT* basa la seva estratègia en una millora substancial de l'eficiència energètica i l'estalvi d'energia en el període 2020-2050 i la implantació d'un important parc de generació renovable a Catalunya que li permetria arribar a un nivell d'electrificació de la seva economia del 77,5% amb una demanda elèctrica de 99,5 TW l'any 2050.

Amb aquesta millora d'eficiència pretén reduir la demanda energètica l'any 2050 fins a valors del 70% de la demanda actual. A més, pren com a hipòtesi que el PIB creixerà un 1,5% anual els propers 30 anys i l'any 2050 se situaria en valors del 162% prenent com 100 el valor actual. Tot això porta a que la intensitat energètica hauria de decreixer de forma constant un 2,7% anual durant els propers 30 anys.

Com es pot comprovar, les demandes d'energia elèctrica de la *PROENCAT* són molt inferiors a l'escenari decreixent d'aquest estudi que preveu importar la meitat de l'hidrogen i que es consideren ja difícilment assolibles.

Com s'ha intentat explicar al llarg d'aquest estudi, considerem que la demanda final d'energia elèctrica a Catalunya es bellugarà en una forquilla compresa entre els escenaris creixent i decreixent (185 i 135 TWh), tant de bo ho faci el més a prop possible del límit inferior, però considerem irreal situar la demanda per sota d'aquell llindar.

Per arribar a cobrir la seva demanda, la *PROENCAT* proposa instal·lar una potència eòlica de quasi 27 GW que considerem que no té cabuda (el nostre potencial màxim se situa en els 20 GW) i una potència fotovoltaica de 33 GW. Nosaltres considerem que hauria de ser, com a mínim, de 58 GW.

A més, la *PROENCAT* fixa un objectiu d'emmagatzematge de potència elèctrica ferma de 7 GW que considerem totalment insuficient i que hauria d'assolir, com a mínim, els 12 GW.

Per últim, proposa electrificar la indústria fins a valors del 80% i el transport fins al 63% però no fa cap proposta sobre com cobrirà la demanda del 20% no electrificat de la indústria i el 37% del transport.

10 Conclusions. 10 propostes dels Enginyers Industrials

La transformació per la descarbonització de Catalunya és un repte majúscul que requerirà treball compartit. Necessitem una visió a llarg termini i també un exercici de realisme que ens permeti visualitzar la magnitud del repte.

La planificació a trenta anys vista s'emboïlla en un entorn altament volàtil i incert que caldrà gestionar amb encert i lideratge. Per això, des del col·lectiu d'Enginyers Industrials creiem que haurem de tenir en compte els següents punts:

- 1. La garantia de subministrament, l'impacte mediambiental de les solucions i el preu final** han de ser els tres elements sobre els quals es fonamenti qualsevol prospectiva energètica.
- 2. El desacoblament del PIB de la demanda energètica és un pilar fonamental de la descarbonització.** Reduir la intensitat energètica a ritme d'un 2% anual, per acostar-nos a l'escenari decreixent, serà fonamental i no gens fàcil. Per aconseguir-ho, caldrà un programa ambiciós i disruptiu.
- 3. Desplegament urgent de les renovables.** Cal multiplicar per 20 la capacitat instal·lada d'energies renovables, fins aproximadament 80 GW. Anem endarrerits i cal impulsar el desplegament urgentment, aprofitant tots els recursos disponibles.
- 4. L'electrificació de la demanda és indispensable però no suficient.** L'electrificació de la demanda ha de ser un vector de transformació. Tot i així, cal no oblidar que encara hi haurà molts processos industrials i de transport on l'electricitat encara no és una opció.
- 5. L'hidrogen i els biocombustibles han de ser pilars fonamentals del model energètic català del futur.** L'any 2050 necessitarem 3 Mt d'H₂, dels quals en podrem tenir capacitat productora per la meitat, i 25 TWh de biocombustibles.
- 6. Emmagatzematge.** La capacitat de generació elèctrica amb renovables haurà d'anar acompanyada d'una gran capacitat d'emmagatzematge que aporti gestibilitat de l'oferta per adaptar-la a la demanda. Caldrà un mínim de 16 GW d'emmagatzematge entre centrals reversibles i tecnologies d'emmagatzematge com bateries o altres.
- 7. Cal augmentar la capacitat d'interconnexió.** Les interconnexions amb sistemes adjacents donen estabilitat. Caldrà augmentar la capacitat de bescanvi d'energia elèctrica amb la resta d'Espanya i d'Europa, al menys fins al 10% de la potència instal·lada i fer que la futura xarxa d'hidrogen estigui també interconnectada.
- 8. Pla de contingència.** La planificació a trenta anys, està plena d'incerteses. Recomanem elaborar un pla de contingència en cas de no poder assolir els objectius que contempli allargar la vida útil de les centrals nuclears o l'ús del gas natural per assegurar el subministrament.
- 9. Mobilitzar inversions.** Valorem entorn als 225.000 M€ el volum d'inversions necessàries per la transició energètica. Caldrà, per tant, ser capaços de mobilitzar aquesta quantitat ingent d'inversions que requerirà participació pública i privada.
- 10. Formació.** Calen al voltant de 150.000 professionals qualificats addicionals per al desenvolupament de la transició. Caldrà fomentar els itineraris formatius orientats a aquestes qualificacions així com formacions per reorientar aquells professionals d'altres sectors que es vegin afectats pels canvis de model.

- Tipus B.- Connexió entre dos embassaments i equipament de turbina-bomba: inversió entre 0,5 i 0,8 M€/MW instal·lat.
- Tipus C.- Creació del nou embassament superior i equipament de turbina-bomba: inversió entre 0,8 i 1,0 M€ / MW instal·lat.
- Tipus D.- Nou bombeig amb construcció dels dos embassaments i equipament de turbina-bomba: inversió entre 1,0 i 1,5 M€/ MW.

La tercera consideració rau en què, a més dels emplaçaments en territori de Catalunya, s'haurien d'estudiar també els que es poden fer amb l'Aragó i França, i que poden enfortir el sistema d'interconnexió elèctrica, ja sigui reforçant eixos de transport existents o bé amb nous eixos de gran capacitat i reduït impacte en el territori.

La quarta i darrera consideració és que cal plantejar instal·lacions de bombament reversible amb una capacitat de reserva d'unes 8 hores amb la finalitat que puguin actuar com a *back up* efectiu a la generació renovable fotovoltaica i eòlica.

Si estudiem embassaments tipus A, ni Escales ni Susqueda, que tenen contra-embassaments a peu de presa, reuneixen condicions per poder plantejar un bombeig reversible. L'únic que reuneix les condicions és Mequinensa, ja que la cota mínima explotació de Riba-roja (cota 58) arriba al peu de la presa de Mequinensa i per tant existeixen uns 80 hm³ de Riba-roja amb possibilitat d'aprofitar per pujarlos a Mequinensa, que té una capacitat de 1.500 hm³.

Sobre Mequinensa–Riba-roja, s'han desenvolupat diversos projectes de bombeig, com són el de Montnegre amb 3.300 MW instal·lats, el de Gironès-Raimat amb 3.061 MW i el d'Endesa amb 1.185 + 41 MW instal·lats. Tot apunta que actualment el projecte de Gironès-Raimat ja ha modificat el plantejament i renuncia a utilitzar Riba-roja com a embassament inferior i sol·licita la concessió del volum necessari per bombejar-turbinar a un dipòsit superior.

Entre les propostes d'Endesa i Montnegre, s'hauria de dictaminar quina és la més adequada des de tots els punts de vista, inclosos el mediambiental i l'econòmic.

Ateses les importants aportacions del riu Segre a Riba-roja, ens permetem apuntar una alternativa als projectes esmentats i que consistiria en un bombeig des de Riba-roja a Mequinensa, instal·lant de l'ordre de 500 MW de turbina-bomba al marge esquerre del peu de presa de Mequinensa amb un cabal de fins a 900 m³/s i de 63 m de desnivell. La ràtio d'aquest aprofitament seria altíssima perquè tan sols serien necessaris entre 100 i 200 m de canonada forçada i el salt brut seria de 63 m i la seva inversió inferior a 0,5 M€ /MW. La xarxa actual de 400 i 220 kV seria suficient per evacuar els 1,9 GW resultants.

Sota els criteris expressats hi hauria la possibilitat de promoure aquests emplaçaments de tipus B:

- B-1 Conca de la Noguera Pallaresa: 5 emplaçaments amb una potència a instal·lar de fins a 4,8 GW, amb pendents de 5,6 a 33%.
- B-2 Conca de la Noguera Ribagorçana: 3 emplaçaments amb una potència a instal·lar de fins a 4,3 GW, amb pendents de 5,5 a 16%.
- B-3 Conca del Garona: 1 emplaçament amb una potència a instal·lar de fins a 90 MW amb pendents del 5,5%.

Això suposa un total de 9 emplaçaments amb una potència tècnica de fins a 9,2 GW.

Cal assenyalar que la viabilitat d'alguns d'aquests emplaçaments podria portar associat un increment de la capacitat d'interconnexió amb França d'uns 4 GW i de l'ordre de 3,4 GW amb l'Aragó.

En relació amb els emplaçaments tipus C, s'ha fet una anàlisi dels possibles dipòsits superiors enllaçables amb embassaments existents, i s'han obtingut aquest resultat:

- C-1 Conca del N. Ribagorçana: 2 emplaçaments d'1 GW
- C-2 Conca del N. Pallaresa: 1 emplaçament de 0,56 GW
- C- 3 Conca de l'Ebre: 1 emplaçament d'1,2 GW
- C-4 Conca del Llobregat: 1 emplaçament de 0,4 GW
- C- 5 Conca del Cardoner: 2 emplaçaments amb un potencial de 85 MW

Tots ells presenten pendents d'entre el 13 i el 31%, raó per la qual es poden obtenir projectes

econòmicament viables i suposa un potencial de 7 emplaçaments amb una potència tècnica de 3,2 GW.

En relació amb els emplaçaments tipus D, tot i que és possible que estiguin en curs altres projectes, hem identificat els següents que totalitzen 3,084 GW:

- D-1 Conca de l'Ebre: 2 emplaçaments amb una potència de fins a 3,06 GW
- D-2 Conca del Fluvià: 1 emplaçament amb una potència de fins a 24 MW

Per tant, el potencial identificat tenint en compte les quatre tipologies de projectes seria de 14 GW.

Econòmicament, la realització d'aquest cens dels 14 GW de bombeig comportaria una inversió d'entre 13.000 i 14.000 M€. El cost, a preus actuals, d'una solució d'emmagatzematge de 14 GW amb bateries de 3 hores de back up seria d'uns 35.000 M€ i cal tenir en compte que la vida útil de les bateries és de l'ordre de 10 anys i el bombeig hidràulic reversible té una vida útil superior als 75 anys.

Això no obstant, com qualsevol altra tecnologia, serà necessari aprofundir en l'estudi de viabilitat econòmica i mediambiental de cada projecte així com la possibilitat de disposar de capacitat d'evacuació/recepció d'energia del sistema elèctric de transport.

Entre totes les alternatives plantejades, s'hauria d'arribar als 14 GW de potència instal·lada.

Cal recordar que les actuacions descrites suposen una baixa afectació al territori, però caldrà tenir en compte el reforç necessari de les xarxes actuals

Annex 2. Potencial tècnic d'energia eòlica a Catalunya

Si analitzem la possibilitat d'instal·lar nova generació eòlica i prenem com a referència el "mapa eòlico ibèric" elaborat, mantingut i actualitzat pel CENER i basat en el mapa eòlic europeu, podem veure que els emplaçaments amb velocitats de vent iguals o superiors a 6 m/s de mitjana a 100 m d'alçada, necessaris per bellugar les noves generacions de màquines eòliques, són limitats i es concentren en un triangle que aniria d'Ulldecona a Serós com a vèrtex al sud i Igualada com a vèrtex al nord amb una superfície estimada d'uns 2.700 km².

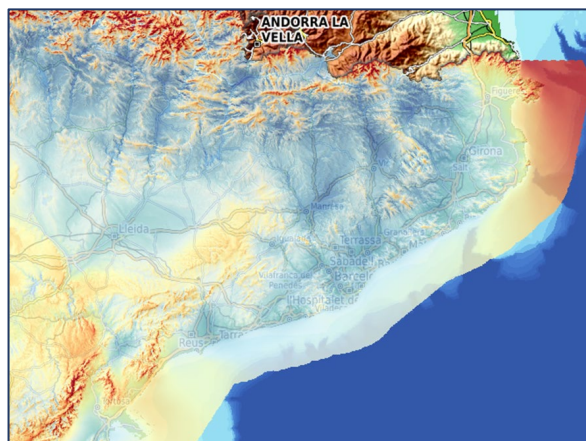


Figura 7. Mapa Eòlic Ibèric (amb to marronós les zones amb $V_{mitja} \geq 6$ m/s a 100 m). CENER

Al nord-est, hi trobem una zona marina d'uns 800 km² compresa entre el cap de Creus i Palamós, i finalment hi hauria possibilitats d'instal·lar alguns parcs al nord de Figueres, en el triangle format per l'autopista, la N-260 i la Serra de l'Albera, d'uns 300 km². Es descarta en aquest estudi la serralada dels Pirineus, per ser 100% espai protegit allà on hi fa vent. En total, suposen uns 3.000 km² en terra dels quals en podem comptar com a útils un 25% (traient zones protegides, àrees urbanes i fondalades). Restarien com a útils, uns 750 km². Pel que fa referència a la zona marina, es considera que els aerogeneradors s'haurien de situar a uns 20 km de la costa, cosa que limita l'àrea útil a una franja de 5 km d'ample per 40 km de llarg, és a dir 200 km².

Considerant que es fa servir la tecnologia més desenvolupada fins al moment, és a dir, màquines de 6 MW de potència amb diàmetres de rotor de 160 m i que cal mantenir un mínim de tres diàmetres en distància horitzontal entre màquines i 1 km en distància vertical: quatre màquines, és a dir, 24 MW, ocuparien 1,28 km². Si tenim 950 km² útils, la potència màxima a instal·lar seria d'uns 18 GW que, afegits als 1,4 existents, totalitzarien 20 GW que podrien produir uns 60,5 TWh/any. Es prendrà, per tant, com a hipòtesi que la potència màxima d'energia eòlica que pot instal·lar Catalunya (màxim tècnic) és de 20 GW.

Annex 3. Potencial tècnic d'energia fotovoltaica a Catalunya

Per avaluar la generació fotovoltaica i el seu potencial d'aprofitament cal primer fer una reflexió sobre les característiques del recurs i de la tecnologia. Dues de les característiques més determinants d'aquest recurs són la seva baixa densitat energètica i la seva ubiqüitat (és present per tot arreu). El que podria ser una limitació es converteix en oportunitat atès que ens permet aprofitar-lo tant en grans superfícies exclusives com en superfícies més petites i distribuïdes o integrades als punts de consum. Pel que fa a la tecnologia, un atribut diferencial d'altres tecnologies de generació és que no ocupa volum, sinó que és bidimensional i estàtic, la qual cosa possibilita la seva integració física o funcional a altres infraestructures.

Aquesta tecnologia aprofita tota la radiació solar incident, tant la directa com la difosa i, a efectes pràctics, es pot considerar que les magnituds són molt similars a tot el territori. Vegeu la figura 8.

La font d'energia no és, doncs, un condicionant a l'hora de triar una ubicació, sinó que tenen més pes altres factors com poden ser la proximitat al consum, la facilitat d'evacuació de la generació, la complementarietat funcional, etc.

Aquesta tecnologia de generació elèctrica intermitent, combinada amb la producció d'hidrogen per a les aplicacions tèrmiques i com

a forma d'acumulació per respondre a la demanda d'una forma determinista, està cridada a aportar el gruix de la producció elèctrica.

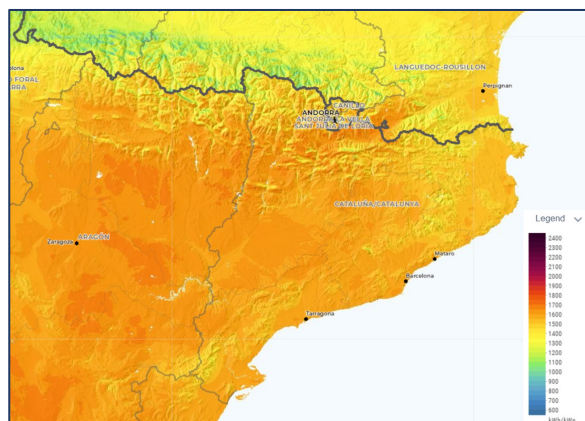


Figura 8. Productivitat fotovoltaica. Font: Global Solar Atlas

Una part d'aquesta generació distribuïda es podrà fer en cobertes, teulades i altres integracions. Segons l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), la petjada de tots els edificis de Catalunya és de 407.431.567 m² (40.743 ha), dels quals 115.608.739 m² (11.561 ha) són naus industrials que representen el 28% del total, i 291.822.828 m² (29.182 ha) són edificis no industrials que representen el 72% del total²⁰.

Tipus	En construcció	Edifici genèric	Ruïnes	TOTAL
No-industrial (Edificació)	747.842 m ²	286.238.277 m ²	4.836.709 m ²	291.822.828 m ²
Industrial (Indústria)	328.139 m ²	114.783.715 m ²	496.885 m ²	115.608.739 m ²
TOTAL	1.075.981 m²	401.021.992 m²	5.333.594 m²	407.431.567 m²

Taula 19. Petjada de les edificacions a Catalunya

El potencial resultant de les instal·lacions solars fotovoltaïques es mostra a la Taula 19, suposant cobrir totes les parts tècnicament disponibles de les cobertes de Catalunya amb plaques solars. Si considerem que seran útils el 20% dels edificis no industrials i el 50% dels edificis industrials, tindríem uns 116.000.000 m² susceptibles d'instal·lar-hi panells fotovoltaïcs.

²⁰ ICGC, Referència Topogràfica Territorial de Catalunya v1.0 2019, Enllaç a l'origen de dades.

Paràmetre	No industrial	Industrial	Total
Edifici a peu de pàgina (m ²)	291.822.828 m ²	115.608.739 m ²	407.431.567 m ²
Sostre tècnicament disponible (m ²)	58.364.566 m ²	57.804.370 m ²	116.168.935 m ²
Potencial d'instal·lació tècnica (MWp)	8.338 MW	8.258 MW	16.596 MW
Potencial energètic tècnic (GWh/any)	10,839 GWh/any	10,735 GWh/any	21,574 GWh/any

Taula 20. Potencial tècnic de Catalunya per a instal·lacions solars fotovoltaïques en cobertes no industrials i industrials.

Amb la tecnologia actual fan falta 7,0 m² de superfície per obtenir 1 kWp, i en conseqüència Catalunya podria assolir una capacitat de 16,5 GWp en teulades i una generació elèctrica, comptant una productivitat mitjana de 1.300 h/any²¹ de 21,5 TWh.

El potencial solar fotovoltaic a cobertes representa una part important. Es pot fer ús d'aquest potencial mitjançant una integració física (l'edifici aporta la subestructura de suport a la infraestructura elèctrica de connexió) o una integració funcional on la generació fotovoltaica és, a més, un element de la funcionalitat i millora energètica de tot l'edifici (eficiència energètica, millora dels processos, gestió de la demanda, etc.).

Per complementar aquesta opció, cal demanar a l'Administració un esforç per poder utilitzar, addicionalment, tots els espais públics o privats on sigui possible la instal·lació de plaques fotovoltaïques com serien: aparcaments de vehicles en superfície, hivernacles, coberts, canals de reg, autopistes, etc.



Figura 9. Exemple de petjades de superfície construïda a partir de la Referència Topogràfica Territorial de Catalunya v1.0 2019. Font: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)

Annex 4. Balanç elèctric mantenint la potència nuclear

Hem comentat al llarg de l'estudi que no es tindria en compte el manteniment de potència nuclear més enllà de les dades fetes públiques pel govern espanyol de tancament de les instal·lacions en funcionament a Catalunya.

Això no obstant, i atès que la solució amb potència nuclear no contribueix a l'emissió de gasos d'efecte hivernacle, i amb caràcter merament acadèmic hem simulat les necessitats de potència renovable mantenint la potència elèctrica més enllà del 2040.

Per no estendre'ns en excés analitzarem els escenaris extrems, és a dir, el creixent i el decreixent.

La comparativa d'instal·lació de potència en l'escenari creixent, important la meitat de l'hidrogen, quedaria així:

Comparativa potència instal·lada any 2050 -escenari creixent-

MW	sense nuclear (a)	amb nuclear (b)	(b)-(a)
hidràulica	1.922	1.922	
eòlica	20.000	20.000	
fotovoltaica	83.000	70.000	-13.000
altres renovables	211	211	
nuclear	0	3.000	3.000
cicle combinat gas	0	0	
cogeneració	0	0	
cicle combinat H ₂	5.000	4.000	-1.000
bateries	10.000	11.000	
bombeig/turbinat	6.000	6.000	
Total potència instal·lada	126.133	116.133	
Total potència ferma	19.282	21.892	
Potència demandada	18.767	18.767	
Saldo potència	515	3.125	

Taula 21. Necessitats de potència renovable mantenint 3 GW de potència nuclear.

Aquí es pot veure que per igual cobertura de la demanda caldria instal·lar 13 GW menys de potència fotovoltaica i no caldria suplir la potència de cogeneració amb cicles combinats amb hidrogen, cosa que donaria com a resultat reduir

²¹ El rendiment es pren com l'actual tot i que l'actual és una mitjana i el rendiment en teulada és inferior al rendiment en parc a terra.

la potència instal·lada el 2050 en 13 GW (16%). Es pot veure que 3 GW de potència nuclear aporten la mateixa potència ferma i energia que 13 GW de fotovoltaica i 1 GW de cicle combinat amb H₂.

Comparativa potència instal·lada any 2050 -escenari decreixent

MW	sense nuclear (a)	amb nuclear (b)	(b)-(a)
hidràulica	1.922	1.922	
eòlica	20.000	20.000	
fotovoltaica	52.000	40.000	-12.000
altres renovables	211	211	
nuclear	0	3.000	3.000
cicle combinat gas	0	0	
cogeneració	0	0	
cicle combinat H ₂	4.000	3.000	-1.000
bateries	6.500	6.000	-500
bombeig/turbinat	4.500	5.000	
Total potència instal·lada	89.133	79.133	
Total potència ferma	14.512	16.352	
Potència demandada	13.670	13.670	
Saldo potència	842	2.682	

Taula 22. Necessitats de potència renovable mantenint 3 GW de potència nuclear.

Pel que fa a l'escenari decreixent, la potència instal·lada es reduiria, també, en 13,5 GW (26%), la potència ferma bateries/bombeig necessària seria només de 14 GW i la potència renovable necessària el 2050 es podria reduir a, tan sols, 60 GW, 20 GW eòlics i 40 GW fotovoltaics. En aquest cas, podem veure que 3 GW de potència nuclear aporten la mateixa energia i potència ferma que 12 GW de fotovoltaica i 1 GW de cicle combinat amb H₂ i 0,5 GW de bateries.

En el cas que no es pogués assolir la potència renovable necessària a l'allargament de la vida útil de les centrals nuclears, sempre que la seguretat de les plantes quedés garantida, seria una solució temporal de baix cost per garantir la potència ferma que és la que, a la vegada, garanteix el subministrament.

Annex 5. Les energies renovables i els materials crítics

La transició energètica requerirà, a nivell mundial, una sèrie de materials i minerals que són considerats crítics i estratègics en quantitats i a un ritme que no s'havien utilitzat fins ara.

La UE i la IEA, que tenen com a prioritat assolir la transició energètica en els terminis compromesos, són coneixedors d'aquesta situació i han publicat recentment una sèrie de documents al respecte entre els quals podem destacar:

- The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (IEA World Energy Outlook Special Report 2021-05)
- Strategic Foresight Report (EU 2021-09), capítol específic dedicat a assegurar i diversificar el subministrament de materials crítics.

En aquest estudi no entrarem a analitzar en detall aquest aspecte, que es desenvoluparà en el futur, però sí que volem destacar la necessitat de prestar-li atenció i seguir la seva evolució a nivell tecnològic, econòmic i geoestratègic.

Copiem a continuació un paràgraf de l'informe de la IEA que resumeix la situació i punt d'atenció al respecte:

"Un sistema energètic alimentat per tecnologies d'energia neta és profundament diferent d'un alimentat pels recursos tradicionals d'hidrocarburs. Construir plantes solars fotovoltaïques (PV) i parcs eòlics i elèctrics i els vehicles elèctrics (EV) generalment requereixen més minerals que els basats en combustibles fòssils homòlegs. Un cotxe elèctric típic requereix sis vegades més aportacions minerals que un cotxe convencional i una planta eòlica terrestre requereix nou vegades més recursos minerals que una central d'energia de gas.

Des de 2010, la quantitat mitjana de minerals necessària per a una nova unitat de capacitat de generació d'energia ha augmentat un 50%, ja que la quota de les renovables ha augmentat. Els tipus de recursos minerals

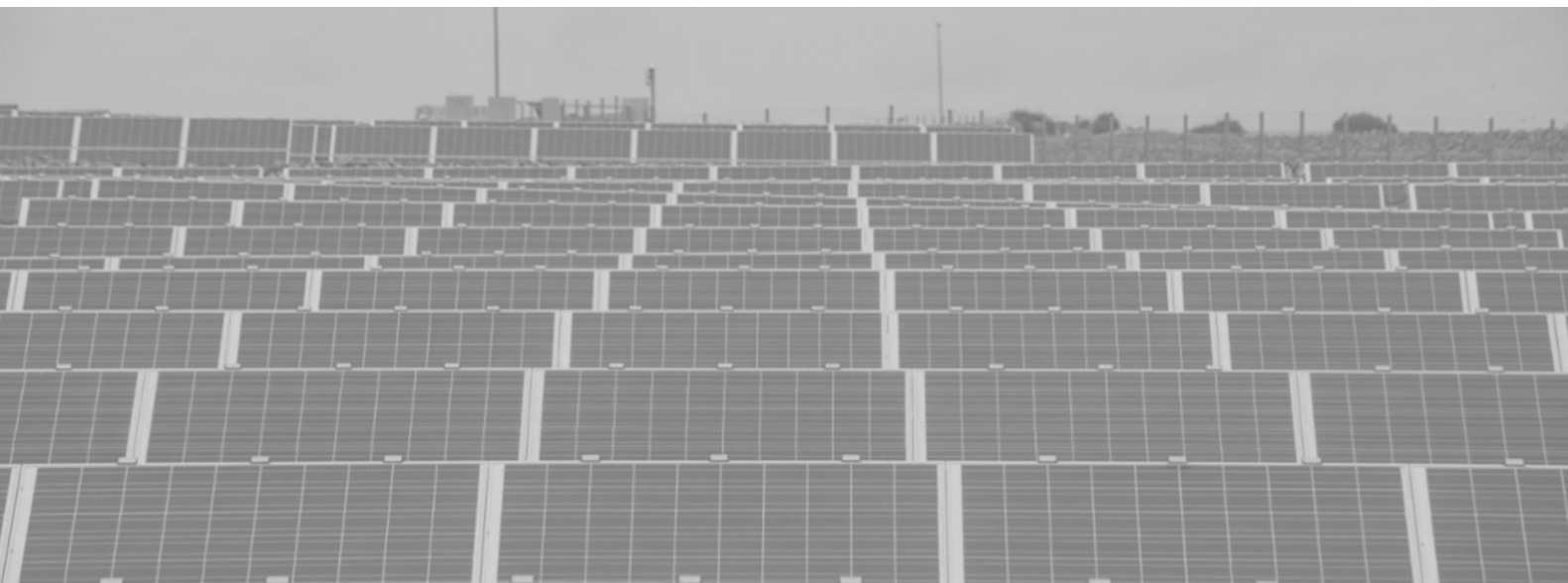
utilitzats varien segons la tecnologia. El liti, el níquel, el cobalt, el manganès i el grafit són crucials pel rendiment, longevitat i densitat energètica de les bateries.

Els elements de terres rares són essencials per als imants permanents que són vitals per als aerogeneradors i motors dels vehicles elèctrics. Les xarxes elèctriques necessiten una gran quantitat de coure i alumini, amb el coure com a pedra angular per a tot allò relacionat amb les tecnologies elèctriques. El canvi a un sistema d'energia neta s'espera que augmenti enormement el requisit d'aquests minerals, és a dir, el sector energètic està emergint com una força important en els mercats de minerals. Fins a mitjans de la dècada del 2010, el sector energètic representava una petita part de la demanda total de la majoria de minerals. No obstant això, a mesura que les transicions energètiques augmenten, les tecnologies d'energies netes s'estan convertint en el segment de demanda de més ràpid creixement.

En un escenari que compleix els objectius de l'Acord de París, la quota de les tecnologies d'energia neta en la demanda total augmenta significativament durant les properes dues

dècades a més del 40% per al coure i els elements de terres rares, 60-70% per a níquel i cobalt, i gairebé 90% per a liti. Els vehicles elèctrics i l'emmagatzematge de les bateries ja haurà desplaçat l'electrònica de consum per convertir-se en el major consumidor de liti i es disposa a prendre el relleu de l'acer inoxidable com el major usuari final de níquel el 2040. A mesura que els països acceleren els seus esforços per reduir les emissions, també han d'assegurar-se que els seus sistemes energètics segueixen sent resistents i segurs. Els mecanismes internacionals de seguretat energètica actuals estan dissenyats per proporcionar una assegurança contra els riscos d'interrupcions o pujades de preu i subministrament d'hidrocarburs, especialment el petroli.

Els minerals ofereixen un conjunt diferent de reptes, però la seva importància creixent en la descarbonització del sistema energètic requereix que els responsables de la política energètica ampliiïn els seus horitzons i considerin noves vulnerabilitats potencials. Les preocupacions sobre la volatilitat dels preus i la seguretat del subministrament no desapareixen en un sistema energètic electrificat i ric en energies renovables".



EDITA
Associació / Col·legi
d'Enginyers Industrials de Catalunya
Via Laietana, 39
08003 Barcelona
93 319 23 00
www.eic.cat

Enginyers
Industrials de Catalunya

