
REAPROFITAMENT I EMMAGATZEMATGE DE L'EXCEDENT ELÈCTRIC PRODUÏT A LA PLANTA FOTOVOLTAICA DEL CAMPUS SUD EN FORMA D'HIDROGEN

TREBALL DE FI DE GRAU
GRAU EN ENGINYERIA DE LES TECNOLOGIES INDUSTRIALS (GETI)

MEMÒRIA

Autor: Antoni Feliubadaló Borràs
Director: Roberto Villafáfila Robles
Convocatòria: Gener de 2021

Universitat Politècnica de Catalunya



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de
Barcelona



Resum

Aquest projecte de fi de grau és un estudi de viabilitat del reaprofitament i emmagatzematge en forma d'hidrogen de l'excedent elèctric teòric generat a la planta fotovoltaica projectada pel Campus Sud de la Universitat Politècnica de Catalunya. Mitjançant les dades de consum elèctric recollides pels informes SIRENA dels darrers anys als edificis de la UPC i la projecció de generació de la instal·lació fotovoltaica dissenyada, es pretén determinar la viabilitat energètica i econòmica de la introducció de l'hidrogen com a vector energètic al campus.

El principi de funcionament de la proposta es basa en l'emmagatzematge d'energia en forma d'hidrogen, obtingut a través de l'electròlisi de l'aigua corrent, per al seu futur ús. L'energia utilitzada en el procés, s'obtindrà de l'excedent elèctric produït per les plaques fotovoltaiques com a alternativa a la venda d'aquest excedent a la xarxa.

L'estudi ha partit de les dades simulades per a la planta de generació projectada a l'edifici de FME (Facultat de Matemàtiques i Estadística), per a una posterior distribució a altres escoles del Campus Sud. Un cop obtingudes les corbes de generació horàries de la instal·lació, s'ha fet un anàlisi energètic i econòmic amb l'objectiu de determinar la viabilitat de l'hidrogen com a vector energètic de abastir la demanda de consum del campus en diferents escenaris.

Abstract

This final degree project is a feasibility study for the reuse and storage of the theoretical surplus electricity generated at the photovoltaic plant projecte dat the Campus Sud of the Universitat Politècnica de Catalunya in the form of hydrogen. Through the electricity consumption data collected by the SIRENA reports of recent years in the UPC buildings and the generation projection of the designed photovoltaic installation, the aim is to determine the energetic and economic viability of the introduction of hydrogen as an energy vector on campus.

The operating principle of the proposal is based on the storage of energy in the form of hydrogen, obtained through the electrolysis of running water, for future use. The energy used in the process will be obtained from the surplus electricity produced by photovoltaic panels as an alternative to the sale of said surplus to the grid.

The study is based on simulated data for the generation plant projected in the FME (Facultat de Matemàtiques i Estadística) building, for later distribution to other schools on Campus Sud. Once the installation's hourly generation curves are obtained, an energy and economic analysis is performed with the aim of determining the viability of hydrogen as an energy vector to supply the consumption demand of the campus in different scenarios.

Índex

Resum	3
Abstract	5
Índex de figures	9
Índex de taules	11
Glossari	13
1. Introducció	15
1.1 Motivació del projecte	15
1.2 Objectius del projecte.....	15
1.3 Abast del projecte	15
2. Estat de l'art.....	17
2.1 L'hidrogen.....	17
2.2 Producció d'hidrogen	18
2.3 Emmagatzematge de l'hidrogen	21
2.4 Usos de l'hidrogen.....	23
2.5 Distribució i aprofitament de l'hidrogen.....	25
2.6 Economia i mercat de l'hidrogen.....	26
3. Regulació vigent sobre les instal·lacions d'hidrogen	29
3.1 Regulació producció	29
3.2 Regulació emmagatzematge estacionari	30
3.3 Regulació distribució	31
3.4 Normativa aplicable	31
4. Emplaçament	33
4.1 Emplaçament	33
5. Instal·lació proposada	35
5.1 Procés	35
5.2 Instal·lació	35
5.3 Escenaris de consum d'hidrogen.....	39
6. Anàlisi de dades	43
6.1 Generació fotovoltaica.....	43
6.2 Demanda energètica.....	45
6.3 Capacitat de generació de l'electrolitzador	50
7. Estudi energètic.....	53

7.1 Estalvis	53
8. Estudi econòmic	55
8.1 Estalvis econòmics	55
8.2 Estudi per escenaris	56
8.3 Inversió inicial.....	56
9. Impacte ambiental.....	57
9.1 Emissions de CO ₂	57
Conclusions	59
Pressupost	61
Agraïments.....	63
Bibliografia.....	65

Índex de figures

Figura 1. Diagrama de principi de l'electròlisi de l'aigua.....	19
Figura 2, Esquema d'un dipòsit d'hidrogen comprimit.....	22
Figura 3. Usos de l'hidrogen com a vector energètic.....	23
Figura 4, Diagrama de principi de la pila de combustible.....	24
Figura 5, Il·lustració de presentació del pla autonòmic de transició energètica de Catalunya [4].....	28
Figura 6. Esquema de generació, emmagatzematge i ús de l'hidrogen.	35
Figura 7. Esquema de construcció d'un electrolitzador PEM (ideagreen.es)	37
Figura 8, Pila de combustible (hidrogen).....	38
Figura 9. Divisió de franges horàries del preu de la llum	39
Figura 10. Diagrames de producció i factors de rendiment de la planta fotovoltaica per mesos naturals.....	43
Figura 11, Diagrama de pèrdues energètiques anuals.....	45
Figura 12. Corba de consum FME (2019).....	46
Figura 13. Corba de consum EPSEB (2019)	46
Figura 14. Corba de consum ETSAB (2019).....	47
Figura 15. Comparació de generació i consum total (FME, EPSEB, ETSAB).....	47
Figura 16. Generació i consum FME	48
Figura 17. Generació i Consum FME (01/04/2019).....	49
Figura 18. Consum total i generació setmanal	49
Figura 19. Evolució del consum d'energia i emissions de CO ₂	57
Figura 20, Instal·lació electrolitzadora comercialitzada per AVICRYO (AVICRYO, 2021, https://es.avicryo.com/).	58

Índex de taules

Taula 1. Comparativa de densitats energètiques dels combustibles més comuns [1]	17
Taula 2. Comparativa característiques piles de combustible.	25
Taula 3. Equipaments que formen el Campus Sud de la UPC.	33
Taula 4. Descripció instal·lació fotovoltaica.	35
Taula 5, Característiques tècniques planta fotovoltaica.	36
Taula 6, Elements escollits per la instal·lació d'estudi.	36
Taula 7. Períodes tarifa 6.1A (Copiada de <i>Comunitat Energètica amb generació fotovoltaica al Campus Sud de la UPC (TFM)</i> , R. Gil, 2021)	40
Taula 8. Cost de l'electricitat per franges. (Copiada de <i>Comunitat Energètica amb generació fotovoltaica al Campus Sud de la UPC (TFM)</i> , R. Gil, 2021)	41
Taula 9, Balanços i producció de la planta fotovoltaica per mesos naturals.....	44
Taula 10. Percentatge de generació front el consum	48
Taula 11. Generació elèctrica en cap de setmana.....	50
Taula 12. KPI's de tecnologies d'electròlisi PEM (<i>H. Europe, Strategic Research and Innovation Agenda, 2019</i>).	51
Taula 13. Generació d'hidrogen per dies.....	51
Taula 14, Densitat energètiques de l'hidrogen per pressions (<i>H. Europe, Strategic Research and Innovation Agenda, 2019</i>).....	53
Taula 15. Preus de compra i venda de l'hidrogen generat.	55
Taula 16. Emissions de CO ₂ evitades.	57
Taula 17. Cost material d'oficina	61
Taula 18. Cost llicències de programari.	61
Taula 19. Cost de personal.	61
Taula 20. Cost total.	62

Glossari

Acrònims

APQ	Almacenamiento de Productos Químicos
BT	Baixa Tensió
EAE	Evaluación Ambiental Estratégica
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
EPSEB	Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona
ETSAB	Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona
ETSEIB	Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona
FME	Facultat de Matemàtiques i Estadística
RD	Reial Decret
UE	Unió Europea
UNE	Una Norma Española
UPC	Universitat Politècnica de Barcelona

1. Introducció

En aquest primer punt del projecte, s'exposen les motivacions, objectius i abast d'aquest.

1.1 Motivació del projecte

Amb l'aprovació del projecte executiu de la instal·lació fotovoltaica de la Facultat de Matemàtiques i Estadística, l'ús de l'energia produïda i les alternatives d'aprofitament d'aquesta prenen importància en el consum elèctric del Campus Sud. La instal·lació projectada, donada la seva elevada potència de generació (200kW), obra la porta a una compensació econòmica a través de la venda o reaprofitament de l'excedent.

Arran de la motivació institucional per part de la UPC en el traç d'un pla de sistemes de generació per a l'autosuficiència energètica, en part, d'origen renovable i l'aparició de tecnologies d'emmagatzematge d'hidrogen, aquest estudi de viabilitat es fa imprescindible per a la recerca d'alternatives a la venda, com a entitat generadora, a la xarxa pública.

1.2 Objectius del projecte

- Avaluar la viabilitat de l'hidrogen com a vector energètic al Campus Sud de la UPC.
- Estudiar la viabilitat econòmica de la proposta i les infraestructures pròpies d'aquesta.

1.3 Abast del projecte

L'abast d'aquest projecte es fixa en la recerca d'una solució tecnològica per a l'estudi de viabilitat energètica i econòmica de la implementació d'una instal·lació productora i d'emmagatzematge d'hidrogen en el context de generació i consum actuals. A través de la comparativa de consum del procés i la generació d'excedent a la planta fotovoltaica, s'estudia la possibilitat d'emprar l'hidrogen com a suplent energètic en els moments de "no-generació" de la planta o en períodes d'elevat cost de compra a xarxa per tal d'evitar donar d'alta la universitat com a central generadora.

L'estudi es realitza a partir de les dades d'energia teòrica generada segons el dimensionament i disseny la instal·lació fotovoltaica, el consum energètic recollit per l'informe SIRENA de 2019 (últim any amb dades sense el biaix generat per la situació de pandèmia mundial) i el subministre energètic potencial del procés d'obtenció i emmagatzematge de l'hidrogen.

2. Estat de l'art

En aquest capítol s'analitza l'estat de l'art de les tecnologies de obtenció i emmagatzematge d'hidrogen, així com del mercat i l'economia entorn aquest.

2.1 L'hidrogen

L'hidrogen (H) és l'element químic més abundant a l'univers. Com a tal, l'hidrogen no és una font primària d'energia com ho serien el carbó, el gas natural o el petroli. L'hidrogen diatòmic (objecte de l'estudi actual) no es troba lliure a la naturalesa, tant sols en les capes superiors de l'atmosfera en concentracions ínfimes i per tant, per al seu ús com a vector energètic, és d'obtenció artificial per mitjà de processos químics. El principi d'aquests processos és l'extracció a partir de fonts naturals portadores d'hidrogen.

Al analitzar l'hidrogen com a possible vector i comparar-lo amb els tradicionals combustibles, ens trobem amb que en la seva combustió, l'hidrogen únicament genera vapor d'aigua com a residu del procés. Des de un punt de vista energètic, l'hidrogen té la major relació energia/massa de la Taula 1. Per contrari, donada la seva condició gasosa i la seva reduïda massa, la seva relació energia/volum és la més baixa dels combustibles usats habitualment.

Fuel	LHV ¹ (MJ/kg)	HHV ² (MJ/kg)	Stoichiometric		Flame Temperature (°C)	Min. Ignition Energy (MJ)	Autoignition Temperature (°C)
			Air/Fuel Ratio (kg)	Combustible Range (%)			
Methane	50.0	55.5	17.2	5-15	1914	0.30	540-630
Propane	45.6	50.3	15.6	2.1-9.5	1925	0.30	450
Octane	47.9	15.1	0.31	0.95-6.0	1980	0.26	415
Methanol	18.0	22.7	6.5	6.7-36.0	1870	0.14	460
Hydrogen	119.9	141.6	34.3	4.0-75.0	2207	0.017	585
Gasoline	44.5	47.3	14.6	1.3-7.1	2307	0.29	260-460
Diesel	42.5	44.8	14.5	0.6-5.5	2327		180-320

Taula 1. Comparativa de densitats energètiques dels combustibles més comuns [1]

¹ LHV: Lower Heating Value (Poder calorífic inferior)

² HHV: Higher Heating Value (Poder calorífic superior)

Deixant a banda les capacitats energètiques de l'hidrogen, la combustió d'aquest presenta avantatges significatives en el seu impacte ambiental. El procés de combustió de l'hidrogen no produeix gasos d'efecte hivernacle, és per això que es presenta com un ferm candidat per a la reducció d'emissions de CO₂ (diòxid de carboni) i la substitució de combustibles com el gas natural a nivell industrial.

Existeixen diversos processos químics per a la producció d'hidrogen, tots ells amb grans diferències en quant al "contenedor" i el mètode de separació. A continuació, es fa una breu introducció dels diversos processos emprats actualment per a l'obtenció d'hidrogen diatòmic, fent especial èmfasi en l'electròlisi, procés d'especial interès per a aquest estudi.

2.2 Producció d'hidrogen

Actualment, tot i representar un percentatge molt baix entre els combustibles usats, l'hidrogen mostra un ampli ventall de processos per a la seva obtenció. Com s'ha comentat prèviament, l'hidrogen no és una font primària d'energia i per tant s'ha de processar de manera que pugui ser emprat com a vector energètic. Els processos més estesos i amb més experiència acumulada són els següents:

2.2.1 Reformat d'hidrocarburs

El procés de reformat consisteix en la mescla d'hidrocarburs (principalment gas natural donada la seva alta concentració en metanol) amb vapor a altes temperatures i baixes pressions. La reacció química és:



Aquest procés té una alta demanda d'energia tant per a la pròpia reacció com per a donar les condicions necessàries al vapor d'aigua. Per altra banda, aquest procés ha de tenir en compte també les diverses impureses del gas natural (principalment sofre "S") i tractar-les prèviament en una etapa d'eliminació i alhora, a través de un o fins i tot dos reactors, es transforma en hidrogen addicional.

El procés de reformat d'hidrocarbur per vapor acumula certa experiència a nivell industrial que, lligat a la creixent infraestructura de distribució de GLP en fa un bon candidat a gran escala. La principal problemàtica, però, és el residu de carboni i compostos de sofre en les superfícies catalítiques que no està encara resolt.

2.2.2 Electròlisi de l'aigua

L'electròlisi de l'aigua es neix l'any 1800 amb el descobriment del procés de separació electrolítica de la molècula de l'aigua per Nicholson i Carlisle, seguit per la formulació de Michael Faraday l'any 1820. Des d'aleshores, l'interès per aquest procés ha tingut punts àlgids, mostrant-se com una alternativa als combustibles fòssils en la crisi del petroli de la dècada dels 70 i la crisi climàtica global.

L'electròlisi de l'aigua, com s'ha explicat anteriorment, consisteix en el pas d'un corrent elèctric entre dos elèctrodes submergits en aigua com es mostra en la figura 1:

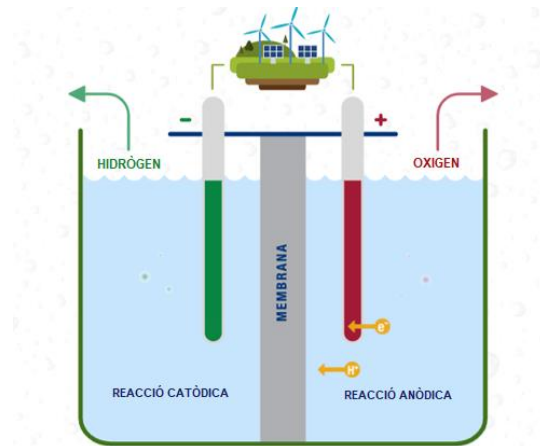


Figura 1. Diagrama de principi de l'electròlisi de l'aigua.

El procés és relativament senzill: mitjançant un corrent elèctric, es força la descomposició de l'aigua en hidrogen i oxigen. Al càtode (elèctrode negatiu) s'hi crea una càrrega negativa, atraient els electrons de l'aigua. Per tancar el flux elèctric, les molècules d'aigua properes al càtode, es trenquen i descomponen en un ió hidrogen H^+ i un ió hidròxid OH^- . La reacció és la següent:



L'aigua es descompon en ions amb càrrega ja que l'àtom d'oxigen és més electronegatiu que l'hidrogen. Això permet, a més, que l'ió hidròxid resultant sigui més estable. Resultant d'aquest trencament, s'obté un ió hidrogen que, al reaccionar amb els electrons del càtode resulta en un àtom d'hidrogen neutre:



Aquest àtom, en conseqüència, s'uneix amb una altre àtom fruit de la mateixa reacció formant una molècula d'hidrogen:



De manera simultània, l'ànode (elèctrode positiu) retira l'electró que l'ió hidròxid havia obtingut de l'àtom d'hidrogen. L'ió resultant, es recombina amb tres altres ions formant la següent reacció:



D'aquesta manera, es tanca el circuit resultant en una molècula d'oxigen estable i l'emmagatzematge de l'energia aportada per la bateria en forma d'hidrogen.

2.2.2.1 Electrolitzadors

Actualment, la tecnologia entorn l'electròlisi ha avançat considerablement en diversos tipus d'electrolitzadors. Els tres tipus explicats a continuació són els que, a dia d'avui, resulten més prometedors en quant a eficiència i viabilitat.

Electrolitzadors d'alcalí líquid

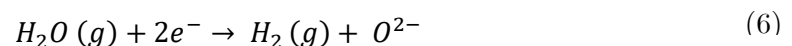
Aquests electrolitzadors compten amb una gran experiència a nivell industrial i producció a gran escala. Donada la baixa conductivitat elèctrica de l'aigua corrent, aquests electrolitzadors utilitzen un electròlit líquid dissolt en l'aigua (usualment, una solució del 25% d'hidròxid de potassi). Aquest tipus d'electrolitzadors ha assolit, en determinats casos, eficiències de fins el 80%.

Electrolitzadors de membrana polimèrica (PEM)

El principi d'aquests electrolitzadors és l'ús d'una membrana d'intercanvi de protons en substitució de l'electròlit líquid. Els electrolitzadors de membrana polimèrica encara estan en fases de desenvolupament però ja en el mercat, usats per a produccions a més petita o mitjana escala. S'alimenten d'aigua pura i produeix un hidrogen molt pur (99,999%) que es pressuritza directament en el sistema. Amb aquest tipus d'electrolitzadors s'obté una resposta ràpida amb fluxos elevats de producció, requeriments necessaris per a l'acumulació d'energia procedent de fonts renovables, donat el seu caràcter fluctuant. Els principals inconvenients d'aquest tipus d'electrolitzadors són la obtenció dels materials i el cost d'aquests.

Electrolitzadors d'òxid sòlid

Els electrolitzadors d'òxid sòlid, a diferència dels altres tipus esmentats, treballen a altes temperatures (800-1000°C) substituint l'electròlit per un d'òxid sòlid. El procés d'electròlisi varia lleugerament sent les reaccions al càtode i a l'ànode les següents respectivament:



L'aigua entra a la cel·la en estat vapor i amb el pas de corrent les molècules d'hidrogen s'acumulen al càtode, mentre els ions d'oxigen penetren a través de l'electròlit sòlid fins l'ànode on resulten en molècules d'oxigen. Aquest procés es presenta com el més ferm candidat a una electròlisi 100% eficient en un futur tot i que, a hores d'ara, presenta diverses complicacions com ara les altes temperatures (incompatibles amb les tecnologies d'energies renovables actuals) i la degradació dels materials donades les condicions de treball.

2.2.3 Processos tèrmics

Amb la descomposició de certs compostos a altes temperatura aprofitant fonts energètiques com ara reactors nuclears o forns solars, es pot generar hidrogen net.

Entre aquests mètodes trobem el reformat, la gasificació o la piròlisi. Tots aquests processos depenen de la temperatura emprada podent arribar als 2.500K que els fan, en certa mesura, inaplicables a la pràctica. Disminuint la temperatura, trobem mètodes com la descomposició de sulfats metàl·lics.

El procés consisteix en la descomposició tèrmica a temperatures properes als 1.100K, on es genera l'òxid metàl·lic i gasos. En una segona etapa, l'òxid metàl·lic s'oxida amb vapor d'aigua i el propi òxid, generant de nou l'inicial compost i alliberant oxigen.

Aquest mètode presenta una elevada eficiència i no genera diòxid de carboni però no s'ha arribat a implementar mai a escala industrial i per tant no es tenen dades que l'assegurin com a viable en un futur.

2.2.4 Altres processos “verds”

Existeixen altres processos on les emissions contaminants són nul·les que parteixen de contenidors naturals com ara el reformat de precursors renovables (etanol i sucres) o la biofotòlisi de l'aigua, que donades dificultats en els catalitzadors o la manca d'experiència industrial fan que no es tinguin en compte en aquest estudi.

2.3 Emmagatzematge de l'hidrogen

L'emmagatzematge, resulta encara una barrera en l'ús de l'hidrogen com a vector energètic. L'emmagatzematge es pot classificar segons sigui estacionari o no. El primer cas fa referència a l'emmagatzematge en els punts de producció, distribució o consum estacionari. El segon, fa referència a l'emmagatzematge i ús durant el transport.

Les dificultats que es troben en l'ús del hidrogen durant el transport no seran estudiades en aquest projecte, doncs no és l'objecte que ens ocupa.

En quant l'emmagatzematge d'hidrogen estacionari, es troben diferents possibilitats que varien en l'estat de l'hidrogen i la seva forma o contenidor:

- Dipòsits d'hidrogen comprimit
- Dipòsits d'hidrogen líquid criogènic.
- Hidrurs químics
- Materials en estat sòlid.

2.3.1 Hidrogen comprimit

L'hidrogen a temperatura ambient es troba en estat gasós i donada la densitat energètic per volum (Taula 1), s'emmagatzema a altes pressions en dipòsits construïts específicament per

a aquesta finalitat. Existeix una àmplia experiència en dipòsits d'hidrogen comprimit, però els reptes que presenten a nivell de costos, resistència als impactes i transport en vehicles es mantenen a l'ordre del dia.

Els dipòsits en qüestió, es fabriquen en una paret exterior d'acer revestit interiorment amb una segona paret de polímer (malla de polietilè o nylon) coberta en una fibra de grafit i reforç d'epoxi. Aquests dipòsits estan certificats per a emmagatzemar gasos a pressions de l'ordre dels 700 bars i s'han utilitzat històricament per a gas metà. Tot i els bons resultats en altres gasos a altes pressions, l'hidrogen presenta una major permeabilitat, que resulta en una penetració del tanc i una pèrdua gradual en la pressió interior. Aquest fet es, amb el degut estudi, podria solucionar-se amb la creació d'una barrera aplicada al revestiment interior per a la difusió de l'hidrogen. Existeixen ja empreses a nivell internacional que declaren haver resolt el problema mitjançant capes amb un baix nivell de permeabilitat, alta adhesió al polímer interior dels dipòsits, baixa massa afegida i reduït cost econòmic.

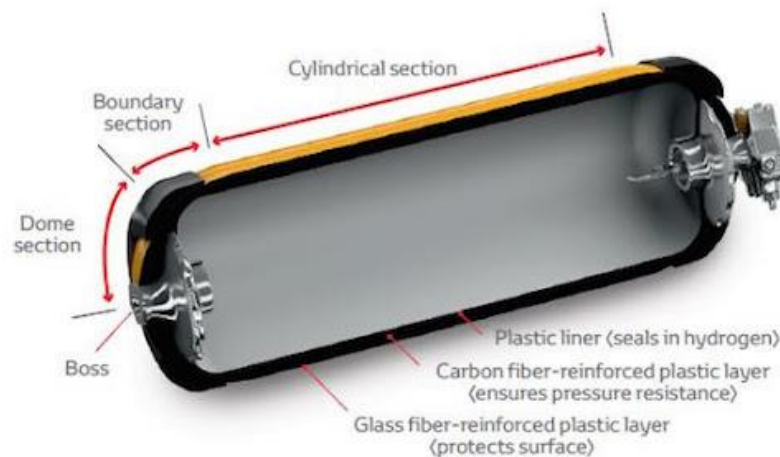


Figura 2, Esquema d'un dipòsit d'hidrogen comprimit.

2.3.2 Altres mètodes d'emmagatzematge

L'emmagatzematge d'hidrogen, com s'ha exposat anteriorment, no es redueix a la seva compressió. S'han estudiat altres mètodes com la seva líquidació a través del cicle d'expansió de Joule-Thompson, l'emmagatzematge mitjançant l'absorció reversible d'hidrogen per part d'hidrurs metàl·lics o l'emmagatzematge en hidrurs químics.

Tots aquests processos, tot i haver tingut aplicacions industrials històricament, no són aplicables al nostre cas, doncs el seu cost econòmic i elevada demanda d'infraestructures dedicades impedeix la seva implantació en un edifici universitari.

2.4 Usos de l'hidrogen com a vector energètic

L'hidrogen és utilitzat en diferents quantitats i estats per a un ampli ventall d'usos ja sigui formant part de processos químics amb diferents etapes o com a principi i final de diferents utilitats. A continuació s'enumeren i expliquen breument els principals usos de l'hidrogen.

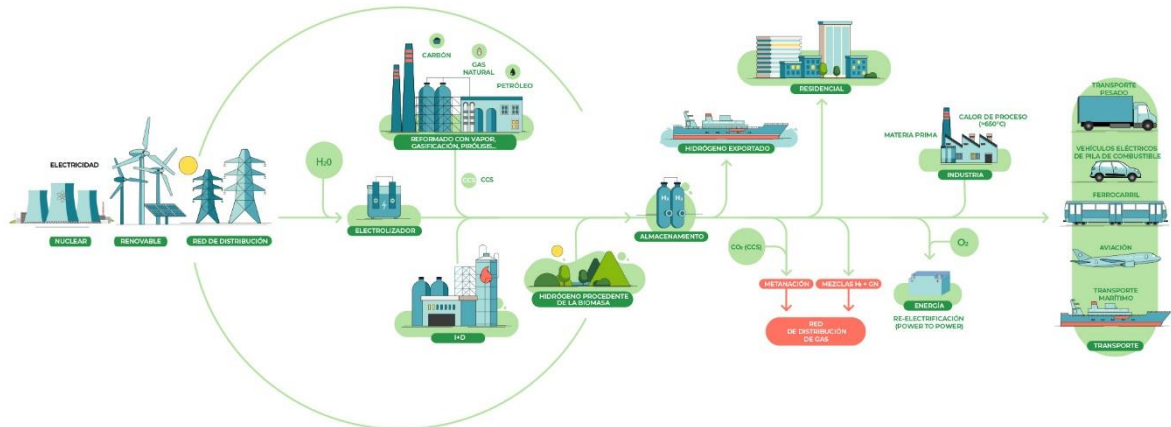


Figura 3. Usos de l'hidrogen com a vector energètic.

2.4.1 Producció d'amoníac

Un dels usos principals a nivell mundial de l'hidrogen és la producció d'amoníac a través del procés Haber-Bosch. Aquest procés, mitjançant la reacció de nitrogen gas i hidrogen gas a través d'un catalitzador de ferro i òxids d'alumini, produeix amoníac, essencial per a la indústria química global.

Tot i la importància d'aquest procés i la revolució que implicà el seu descobriment en la indústria dels fertilitzants, també resulta ser un procés amb un elevat impacte ambiental. L'excés de nitrats a mars i rius i l'enriquiment de la troposfera en ozó són problemàtiques estretament lligades amb aquest procés i, en concret amb l'amoníac.

2.4.2 "Hydrocracking"

L'"hydrocracking" o hidrocracking és un procés de refinat del petroli a través del qual es trenca en molècules més simples com el querosè o la benzina. Aquest procés utilitza hidrogen en estat gasós a altes pressions i temperatures per a l'obtenció dels hidrocarburs combustibles líquids. La quantitat d'hidrogen usat per a aquest procés representa quasi la meitat de l'hidrogen produït a nivell mundial.

2.4.3 Piles de Combustible

La pila de combustible és dispositiu electroquímic basat en la conversió, com les piles convencionals, d'energia química en elèctrica.

El principi de les piles o cel·les d'hidrogen parteix d'un combustible (hidrogen) i un oxidant (generalment oxigen) per, a través de les degudes reaccions produir aigua, electricitat en

corrent continu i calor. Similarment amb els dispositius d'electròlisi, aquestes piles estan compostes per dos elèctrodes (ànode i càtode) i un electròlit.

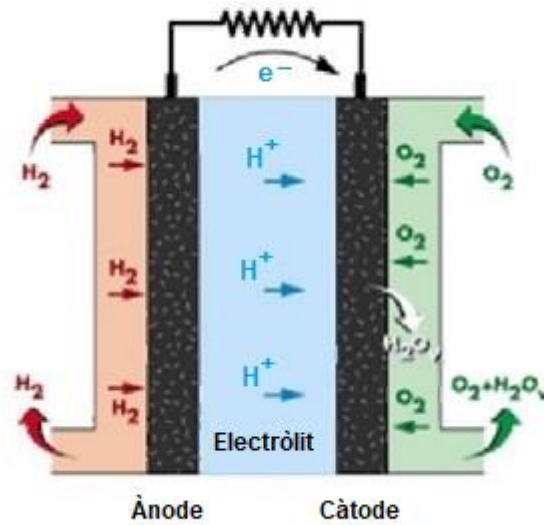
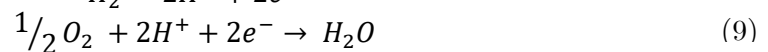


Figura 4, Diagrama de principi de la pila de combustible.

Les reaccions que es duen a terme a l'ànode i al càtode són les següents respectivament:



Resultant en la reacció global:



El combustible (hidrogen) s'injecta a la cel·la del ànode que, en presència d'un catalitzador, es dissocia en ions positius i electrons. L'oxidant (oxigen o aire), penetra pel càtode i es dissocia en ions negatius, també en presència del catalitzador. Els ions d'hidrogen migren a través de l'electròlit que impedeix el pas dels electrons i els força a circular pel circuit extern. D'aquesta manera, al càtode tornen a recombinar-se i es produeix aigua i energia tèrmica. Aquestes cel·les de combustible, apilades i connectades en sèrie formen el que es coneix com a pila de combustible. Donada l'energia tèrmica generada el procés electroquímic, les cel·les han d'anar intercalades amb sistemes que permetin dissipar la calor produïda.

Existeixen diversos tipus de piles de combustible, variant en l'electròlit emprat, la temperatura de treball i el rang de potència.

Electròlit	Membrana de polímer sòlid	Solució alcalina	Àcid Fosfòric	Carbonats fosos	Òxid Sòlid
Temperatura de treball (°C)	60 - 80	100 - 120	200 - 250	600 - 700	800 - 1000
Rang de potència	5 - 250 kW	5 - 150 kW	50 kW - 11 MW	100 kW - 2 MW	100 - 250 kW
Eficiència	85%	55%	40%	60%	75%
Avantatges	Baixa temperatura . Dinàmic. Baixa corrosió i manteniment	Major eficiència. Reacció catòdica més ràpida.	Accepta H ₂ impur.	Reformat intern. Cogeneració.	Reformat intern. Cogeneració
Aplicacions	Transport. Generació portàtil. Residencial.	Espacial.	Generació elèctrica distribuïda i calor.	Generació elèctrica distribuïda i calor.	Generació elèctrica distribuïda i calor.

Taula 2. Comparativa característiques piles de combustible.

2.4.4 L'hidrogen per a combustió

A part de les diferents utilitats exposades, l'hidrogen també pot ser usat per a la combustió en motors d'explosió interna. Aquesta via, tot i ser molt atractiva en el món de l'automoció, requereix d'una ampla infraestructura per a la correcta implementació i distribució. A hores d'ara, encara no s'han reduït suficientment els costos de producció ni emmagatzematge per tal de que sigui una realitat present o ni tant sols una alternativa a mitjà termini.

Les principals dificultats que es troben en aquest àmbit d'aplicació són la seguretat en la distribució i emmagatzematge en transports (cotxes, busos, etc.) i l'elevat cost i la manca d'experiència en les "hidrogeneres" (estacions de servei amb distribució d'hidrogen).

2.5 Distribució i aprofitament de l'hidrogen

La distribució del hidrogen varia segons la seva producció, ja sigui centralitzada o descentralitzada. En cas de produir-se de manera centralitzada, apareix la dificultat de distribuir-lo de manera eficient i respectuosa amb el medi ambient a través d'infraestructures adequades. En cas de produir-se de manera descentralitzada, el procés es simplifica ja que aquesta infraestructura es redueix en gran mesura.

2.5.1 Distribució de la producció centralitzada

Al tractar-se d'un gas molt volàtil, amb un gran volum que emmagatzema poca energia, es requereix de sistemes que encara no estan a l'ordre del dia per al seu correcte transport. Tot i haver una relativa experiència en el transport en curtes distàncies, encara no s'han donat casos en els que s'hagi pogut implementar una xarxa de distribució d'hidrogen que compleixi els mínims d'eficiència ni econòmica ni energètica. Actualment, els sistemes utilitzats per al transport d'hidrogen de consum industrial són:

- Per carretera, mitjançant ampolles pressuritzades.
- Per tren o vaixell, també en ampolles pressuritzades o en dipòsits d'hidrogen líquid criogènic.

El projecte HyWAYS¹, va presentar una publicació l'any 2008 [2] on presentava i analitzava les diferents "rutes" que podia prendre l'hidrogen segons els diferents usos que se li donessin.

- Punts de subministre d'hidrogen pressuritzat: Dedicats al vehicle privat i autobusos urbans (per a piles o motor de combustió interna). El principal problema d'aquest mètode recau sobre els costos econòmics de la infraestructura necessària per a un subministre segur i eficient i del cost de producció de l'hidrogen, que faci d'aquest, una alternativa viable.
- Punts de subministre d'hidrogen líquid: Mercat reduït a motocicletes i al subministre d'hidrogen en cartutxos.
- Hidrogen canalitzat: Possible només per a aplicacions estacionàries, d'ús residencial o comercial amb piles de combustible.
- Subministre en ampolles a pressió: Destinat a aviació i vehicles de gran ús.

2.5.2 Distribució de la producció descentralitzada

Pel que fa a la distribució de la producció descentralitzada, actualment Estats Units és el país amb més quilòmetres construïts, tots ells per al consum en les pròpies instal·lacions. L'elevat cost de construcció i de la infraestructura que se'n deriva, és encara una barrera pel que és, provablement, la manera més eficient i econòmica per a la distribució d'hidrogen.

2.6 Economia i mercat de l'hidrogen

Havent fet un breu anàlisi de l'estat de l'art entorn la producció, l'emmagatzematge i la distribució de l'hidrogen, en aquest punt s'explica el mercat actual l'hidrogen i la seva economia.

2.6.1 Economia i mercat mundial

Actualment, a nivell mundial, la demanda d'hidrogen pur es troba per sobre les 75 Mt (milions de tones cúbiques) afegits a unes 45 Mt d'hidrogen en mescla amb altres gasos. El gruix d'aquesta demanda és emprat per al refinat de petroli i producció d'amoníac. La

¹ HyWAYS, projecte co-fundat per instituts de recerca, empreses del sector privat i la Comissió Europea per al desenvolupament d'un mapa de carreteres europees per a l'energia en forma d'hidrogen. (<http://www.hyways.de/>)

creixent demanda en aquests àmbits beneficia la recerca de mètodes de producció i distribució amb un baix cost econòmic tot i que, segons dades del Hydrogen Analysis Resource Center², només una petita part de l'hidrogen produït és per a la venda a tercers. L'ampli sector d'ús d'aquest combustible es centra en la producció i consum en la mateixa planta, fet que va en detriment del desenvolupament de les xarxes nacionals i internacionals d'hidrogen.

Tot i l'avenç de les tecnologies del sector, l'estudi mundial es centra en la producció d'hidrogen per al seu ús en la producció de compostos amb densitats energètiques majors com l'amoníac, la opció amb major sortida en quant el transport.

Les diferents dificultats que presenta l'hidrogen com a combustible de transport fa els plans de desenvolupament internacionals quedin petits per a una correcta implementació mundial. En concret, des de la Comissió Europea, s'aposta per una inversió en les tecnologies de l'hidrogen que assegurin el creixement de les infraestructures de producció i distribució ja des del 2004, any de creació de la Plataforma Tecnològica de la Unió Europea en Hidrogen i Piles de Combustible³. Aquesta plataforma pretenia accelerar el desenvolupament i l'explotació de les tecnologies relacionades amb l'hidrogen en l'àmbit europeu, així com impulsar tota iniciativa ja fos nacional, regional o local. Tot i les diverses iniciatives per part de les diferents administracions europees, les tecnologies del hidrogen no han florit com s'esperava i els països capdavaners segueixen sent els Estats Units, Japó i Corea del Sud.

2.6.2 Economia i mercat estatal

En el marc estatal, l'hidrogen es manté en una pla secundari (fins i tot terciari) donada la manca de projectes i el diferencial de costos respecte altres combustibles. Similarment a la Unió Europea, l'any 2005 es va crear la Plataforma Tecnològica Espanyola de l'Hidrogen i les Piles de Combustible⁴ que pretenia, igual que en el cas europeu, vetllar per la implementació i l'impuls de tot projecte relacionat amb aquestes tecnologies. Malgrat la recessió econòmica viscuda i les retallades en les àrees d'investigació dels centres tecnològics, l'hidrogen es manté en el Plan de Recuperación del Gobierno de España⁵ com un repte per a l'assoliment de l'objectiu global de "cero emisiones 2050". L'objectiu actual és crear un entorn favorable pel desenvolupament i desplegament de l'hidrogen com a vector energètic clau en el futur.

² Hydrogen Analysis Resource Center, Centre de divulgació i avaluació de dades entorn les tecnologies de l'hidrogen. (<https://h2tools.org/hyarc>)

³ Plataforma Tecnològica de la Unió Europea en Hidrogen i Piles de Combustible, Plataforma amb l'objectiu de consolidar la posició de la UE com a principal integrant a nivell internacional en el subministrament i aplicació de tecnologies de l'hidrogen. (<http://www.ptehpc.org/>)

⁴ Plataforma Tecnològica Espanyola de l'Hidrogen i les Piles de Combustible, Iniciativa promoguda per l'Associació Espanyola de l'Hidrogen i emparada pel Ministeri de Ciència i Innovació per al desenvolupament i aplicació estatal de les tecnologies de l'hidrogen. (<http://www.ptehpc.org/>)

⁵ Plan de Recuperación del Gobierno de España, Pla estratègic de l'estat espanyol per a la canalització de fons destinats per Europa per reparar els danys provocats per la crisi del COVID-19 i construir un futur més sostenible. (<https://planderecuperacion.gob.es/>)

En quant a les iniciatives privades o subvencionades en menor part per l'estat, existeixen associacions com la Asociación Española del Hidrogeno⁶ que, des de la seva fundació l'any 2002, aglomera tot tipus d'empreses en contacte amb les diverses fases del circuit o mercat de l'hidrogen (producció, emmagatzematge, distribució i ús).

Pel que fa a dades, citant l'informe Worldwide Captive Hydrogen Production Capacity at Refineries de l'Hydrogen Analysis Resource Center [3], Espanya es trobava en la novena posició a escala mundial en la producció d'hidrogen pur (independentment del seu ús o finançament). Malgrat aquestes dades, la xarxa d'infraestructures estatals per a la distribució i la implementació del cicle del hidrogen segueix en etapes quasi embrionàries en comparació amb la resta de combustibles actuals.

2.6.3 Economia i mercat autonòmic

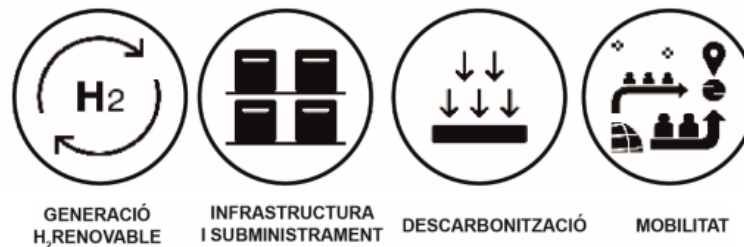


Figura 5, Il·lustració de presentació del pla autonòmic de transició energètica de Catalunya [4].

Arribat el torn de les legislacions i iniciatives d'impuls per a l'ús de l'hidrogen, la Generalitat de Catalunya, en el marc del Pacte Nacional per a la Transició Energètica de Catalunya [4] i la llei 16/2017 del canvi climàtic, ha creat quatre diferents grups de treball:

- Generació d'hidrogen renovable, a partir d'energia solar, eòlica i biomassa.
- Infraestructura i subministrament: transport, distribució i subministrament d'hidrogen.
- Descarbonització al sector industrial i als edificis.
- Mobilitat (en col·laboració amb la Direcció General d'Indústria)

Aquests grups de treball es creen el passat 26 de maig de 2020 amb la intenció de generar la documentació i els informes necessaris per iniciar la transició energètica de la indústria i autoconsum al principat.

⁶ Asociación Española del Hidrogeno, Associació espanyola formada per empreses del sector privat que treballa per fomentar, promoure i impulsar el desenvolupament tecnològic i industrial de les tecnologies de l'hidrogen. (<https://www.aeh2.org/>)

3. Regulació vigent sobre les instal·lacions d'hidrogen

En aquest capítol es fa un breu anàlisi de la legislació i normativa aplicable a les instal·lacions de generació i emmagatzematge d'hidrogen per al propi consum.

A continuació, es fa un estudi de l'estat de les diferents regulacions entorn la producció i l'emmagatzematge d'hidrogen per a l'autoconsum.

3.1 Regulació producció

Existeixen diverses legislacions nacionals i regionals entorn la producció d'hidrogen, però totes elles provenen de directives europees. En concret les enumerades a continuació:

- Directiva SEVESO (2012/18/EU)
- Directiva ATEX (2014/34/EU)
- Directiva 2010/75/EU entorn les emissions industrials

Aquestes directives, aplicables a tots els “estats membres” de la UE, donen certa llibertat a cada estat per tractar segons creguin més convenient entorn cada àmbit.

A nivell estatal, com a la resta de la UE, la producció d'hidrogen està considerada com una activitat industrial al classificar-se com una indústria química per a la producció d'un gas inorgànic sense tenir en compte el mètode de producció, la quantitat diària produïda, la capacitat d'emmagatzematge ni la finalitat de dita producció. Aquesta consideració restringeix la construcció d'aquest tipus d'infraestructures en sòl no qualificat com a industrial, limitant així la implantació d'electrolitzadors en sòls classificats d'altra manera. Per tant, és racional la seva construcció prop de plantes fotovoltaïques (com el nostre cas), parcs eòlics, estacions de servei ubicades en sòl urbà o fins i tot en edificis per a l'autoconsum.

Tot i la àmplia legislació i normativa tant a nivell europeu com espanyol entorn les activitats industrials, la producció d'hidrogen segueix constant com a indústria química i per tant subjecta a totes les restriccions que això suposa.

Per tant, la producció d'hidrogen queda classificada dins el règim “Industrias químicas” recollit a la Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de Contaminación, en l'apartat 4.2 “Instalaciones químicas para la fabricación de productos químicos inorgánicos, així com per diverses UNEs (Una Norma Española) ratificades fa poc més d'un any.

Digne de menció, però, és la intenció d'avenç entorn la legislació actual. Tant a nivell europeu com estatal existeix una direcció cap a la reformulació i reestructuració de les

normatives aplicables. La entitat HyLAW⁷ va presentar un informe a mitjans de 2019 fent un anàlisi de la situació de la legislació entorn l'hidrogen a nivell europeu i les limitacions que aquesta suposa per al correcte desenvolupament del sector. Dit informe, públic a la pàgina de HyLAW, enumera les directives europees esmentades anteriorment com a “àncores” que han quedat ja desfasades. Critica durament la manca de distinció entre els mètode de producció i el volum de producció de les plantes [5].

Per altra banda, a l'estat espanyol, existeix un informe presentat als òrgans competents per a modificar el redactat de la legislació actual a nivell espanyol entorn les instal·lacions de producció d'hidrogen per electròlisi. Aquest informe defensa les grans diferències entre processos de producció d'hidrogen (reformat d'hidrocarburs i electròlisi per exemple) i la necessitat de classificar-los en règims diferents.

Malgrat les diverses iniciatives de replantejament de la normativa entorn les tecnologies de l'hidrogen i la seva generació, encara no ha aparegut cap llei o decret en ferm que n'actualitzi la regulació i per tant, segueix lligada a la normativa industrial actual.

3.2 Regulació emmagatzematge estacionari

Similarment amb la producció, la normativa segueix sent ambigua o desactualitzada, deixant buit en la prevenció de riscos o posant traves al lliure desenvolupament de les tecnologies d'emmagatzematge. El propi projecte HyLAW conjuntament amb la Fundación Hidrogeno Aragón⁸, mencionats anteriorment, va desenvolupar a mitjan 2020 un informe entorn l'estat de la normativa de l'hidrogen a l'estat espanyol. L'informe, apunta i enumera els diferents inconvenients que presenta la normativa estatal al desenvolupament:

- Mateix tractament energètic que l'industrial.
- Procediments complexos per a projectes a petita escala.
- Manca de directrius en l'administració i els òrgans ambientals.

Per aquests motius, l'informe proposa diferents actuacions com per exemple la creació d'una comissió especialitzada que treballi cap a un desenvolupament i adaptació de la normativa, adaptacions dels tràmits administratius, evitar l'aplicació necessària de les directives d'impacte ambiental (Evaluación de Impacto Ambiental i Evaluación Ambiental Estratégica) en projectes a petita escala o adaptar-los a les necessitats d'aquests.

A banda d'aquests informes de comissions europees, existeixen diverses normes UNE entorn les tecnologies de l'hidrogen arran de la creació del comitè “CTN 181 – Tecnologies el

⁷ HyLAW, Entitat que coordina més de 20 països pel desenvolupament legal dels estats entorn les tecnologies de l'hidrogen. (<https://www.hylaw.eu/>)

⁸ Fundación para el desarrollo de las nuevas tecnologías del hidrogeno en Aragón. Fundació aragonesa que vetlla pels projectes de l'hidrogen a curt, mitjà i llarg termini dins la comunitat autònoma. (<https://hidrogenoaragon.org/es/>)

Hidrogeno⁹. Davant la manca de normatives fermes, existeix també una Nota Tècnica de Prevenció (NTP 50) emesa pel Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales que regula diferents aspectes de la prevenció de riscos laborals en les instal·lacions d'emmagatzematge d'hidrogen.

3.3 Regulació distribució

Com amb la producció i emmagatzematge d'hidrogen, la normativa resta desactualitzada per al desenvolupament, mantenint-se encara lligada als productes químics generals.

Tot i l'existència d'iniciatives estatals que vetllen per a la transició energètica cap a combustibles “verds”, la normativa de distribució de l'hidrogen com a combustible es troba en etapes inicials en termes de distribució reglada. La normativa es centra principalment en la distribució per a hidrogen de transport (per a vehicles) i queda curta en quant a hidrogen d'autoconsum.

3.4 Normativa aplicable

Normatives i directives de la UE:

- Directiva SEVESO (2012/18/EU) relativa al control dels riscos inherents als accidents greus en que intervinguin substàncies perilloses.
- Directiva ATEX (2014/34/EU), sobre la harmonització de les legislacions dels estats membres en matèria d'aparells i sistemes de protecció per a ús en atmosferes potencialment explosives.
- Directiva 2010/75/EU entorn les emissions industrials.
- Directiva EIA.
- Directiva SEA.
- Reglament 1907/2006 del Parlament Europeu, del 18 de desembre, relatiu al registre, l'avaluació, l'autorització i la restricció de les substàncies i preparats químics.
- Reglament 1272/2008 del Parlament Europeu, del 16 de desembre, sobre classificació, etiquetatge i envasat de substàncies i barreges perilloses.

Normatives, instruccions tècniques, RDs (Reials Decrets) i lleis estatals (Espanya) en matèria de seguretat industrial i prevenció de riscos:

- Llei 16/2002.
- RD 842/2002, del 2 d'agost, pel qual s'aprova el Reglament electrotècnic per a baixa tensió.
- RD 1196/2003, del 19 de setembre, pel qual s'aprova la Directiu bàsica de protecció civil per al control i planificació davant el risc d'accidents greus en que intervinguin substàncies perilloses.

⁹ CTN-181. Comitè format per a la normalització dels aspectos relacionats amb els sistemes i dispositius per a la producció, emmagatzematge, transport i distribució, medicació i utilització de l'hidrogen. (<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/comites-tecnicos-de-normalizacion/comite?c=CTN%20181>)

- RD 919/2006, del 28 de juliol, pel qual s'aprova el Reglament tècnic de distribució i utilització de combustibles gasosos i les seves instruccions tècniques complementàries ICG 01 a 11.
- RD 2060/2008, del 12 de desembre, pel qual s'aprova el Reglament d'equips a pressió i les seves instruccions tècniques complementàries.
- RD 709/2015, del 24 de juliol, pel qual s'estableixen els requisits essencials de seguretat per a la comercialització d'equips a pressió.
- RD 840/2015, de 21 de setembre, pel qual s'aproven mesures de control dels riscos inherents als accidents greus en els que intervenen substàncies perilloses.
- RD 656/2017, del 23 de juny, pel qual s'aprova el Reglament d'emmagatzematge de productes químics i les seves instruccions tècniques MI E APQ 0-10, especialment la MI E-APQ-5.
- NTP-50.
- Normatives UNE aplicables.

4. Emplaçament

En aquest punt es determina l'emplaçament i la situació de la instal·lació fotovoltaica aprovada i la instal·lació de producció d'hidrogen a projectar.

4.1 Emplaçament

Com comentat en el apartats anteriors d'aquest document, la instal·lació fotovoltaica està projectada i aprovada en el Campus Sud de la UPC, incloent dins aquesta zona la Facultat de Matemàtiques i Estadística, l'Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona i l'Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona. La instal·lació de producció d'hidrogen, per tant, i l'estudi de viabilitat, estan centrats en l'abastiment d'aquests tres equipaments, les referències cadastrals i localitzacions exactes dels quals queden recollides a la següent taula.

Edifici	Referència Cadastral	Direcció	Coordenades
FME	6118501DF2861G0001FS	C/ Pau Gargalló, 10 N2-18	41°23'01"N 2°06'56"E
ETSAB	5919701DF2851H0001LJ	Av. Diagonal, 649	41°23'01"N 2°06'51"E
EPSEB	5919701DF2851H0001LJ	Av. Diagonal, 649	41°23'01"N 2°06'48"E

Taula 3. Equipaments que formen el Campus Sud de la UPC.

En quant a la instal·lació generadora d'hidrogen, per facilitat i reducció de costos, es considera que l'emplaçament idoni seria al centre de transformació del Campus Sud.

Tot i aquesta premissa, l'estudi de la sala o planta òptimes per a l'emplaçament exacte de la instal·lació d'hidrogen quedaran pendents per a futurs estudis o projectes.

5. Instal·lació proposada

En aquest capítol, s'introdueix el cas d'estudi, definint el procés de generació de l'hidrogen i les seves característiques tan físiques com energètiques.

5.1 Procés

Havent fet ja una breu introducció als diferents mètodes de producció d'hidrogen, cal escollir el procés amb la millor relació entre cost i rendiment energètic que s'adapti a les necessitats i a les limitacions de les infraestructures del Campus Sud de la UPC. Fent una ràpida observació dels arguments exposats, la localització de la instal·lació projectada i el cost econòmic i energètic de les opcions enumerades, el procés més adequat per al nostre estudi és l'electròlisi d'aigua mitjançant un electrolitzador de membrana polimèrica (PEM) per a l'emmagatzematge en dipòsits d'hidrogen comprimit per a la seva posterior transformació a través de piles de combustible.

Per tant, la instal·lació proposada tindria el següent esquema:

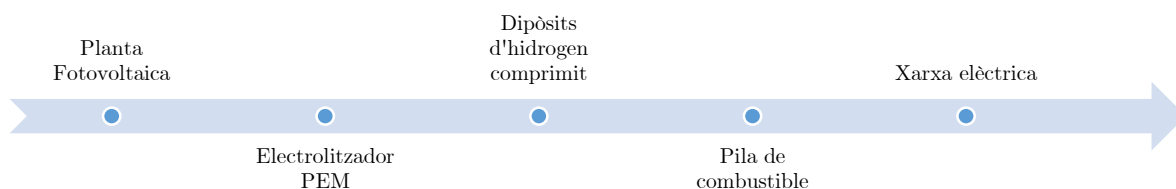


Figura 6. Esquema de generació, emmagatzematge i ús de l'hidrogen.

5.2 Instal·lació

5.2.1 Instal·lació fotovoltaica

La instal·lació fotovoltaica de la qual parteix l'estudi ha estat projectada i acceptada recentment a través d'una licitació. Les característiques bàsiques de la instal·lació queden recollides a la següent taula:

Tipus d'instal·lació	
Tipus d'integració:	Coberta
Tipologia:	Autoconsum amb excedents
Inclinació:	10 ^o en cobertes laterals i nord, 25 ^o en coberta sud

Taula 4. Descripció instal·lació fotovoltaica.

Dades planta fotovoltaica	
Potència pic [kWp]:	214,40
Potència nominal [kW]:	200
Inversors de potència	
Nº d'inversors:	4
Potència inversors:	50
Tensió [V]/Frequència [Hz]:	400/50
Camp fotovoltaic	
Nº total de mòduls:	670
Tipus de tecnologia:	Monocristal·lins
Potència dels mòduls [Wp]:	320
Composició. Nº strings (files):	34 strings, 22 strings de 19 mòduls + 12 strings de 21 mòduls
Superfície total (m2):	1.119 m2
Dades de generació	
Estimació energia generada [kWh/any]	300.660

Taula 5, Característiques tècniques planta fotovoltaica.

Les característiques tècniques i la justificació del dimensionament de la instal·lació fotovoltaica es pot trobar al projecte tècnic de la licitació, penjat de manera pública a la plataforma de contractació pública de la Generalitat de Catalunya.

En quant a les característiques d'importància per al nostre estudi, ens centrem en les estimacions de generació de la planta per part del projecte tècnic. Aquestes estimacions s'han dut a terme a través de programari de reconegut prestigi en l'àmbit i els donarem com a bons, ja que el nostre objecte d'estudi no és la pròpia planta fotovoltaica si no la planta d'electròlisi, en la qual ens centrem en el proper apartat.

5.2.2 Instal·lació d'hidrogen

En aquest punt, es defineix la solució tecnològica entorn la instal·lació de generació d'hidrogen i els seus components. El dimensionament, però, serà posterior a l'anàlisi de necessitats energètiques dels edificis (punt 6.4).

Partint de l'anàlisi de l'estat de l'art dels diferents tipus d'instal·lacions de generació i distribució d'hidrogen, escollim els següents components per a la instal·lació d'estudi:

Element generador	Element de emmagatzematge	Element de conversió
Electrolizador PEM	Tancs d'hidrogen comprimit	Pila de combustible

Taula 6, Elements escollits per la instal·lació d'estudi.

Per a la simplicitat de la instal·lació, tota la infraestructura es trobaria localitzada en dues sales contigües. En una primera sala s'hi instal·laria l'electrolitzador i els dipòsits d'hidrogen. En la segona sala, hi trobaríem les piles de combustible i la instal·lació de reinjecció a la xarxa elèctrica del Campus.

Element generador

Donades les consideracions aportades, els electrolitzadors de membrana polimèrica són els que més s'ajusten a les necessitats i limitacions de l'escenari proposat. Aquests són capaços de treballar de manera eficient i dinàmica en intervals discontinus de disponibilitat d'energia elèctrica, podent-se adaptar d'aquesta manera a les condicions de generació d'electricitat d'una planta fotovoltaica com és el nostre cas.

A la vegada, a diferència dels electrolitzadors en medi alcalí, l'aigua usada no necessita de cap tractament previ, ja que intercanvia l'electròlit líquid per un de sòlid, reduint així el cost i la infraestructura necessària de la instal·lació.

Afegit a les avantatges ja exposades, els electrolitzadors PEM contenen amb una àmplia experiència en la producció d'hidrogen industrial tant a petita com a mitjana escala, mostrant-se així com el més ferm candidat per a una instal·lació de generació d'hidrogen viable energètica i econòmicament.

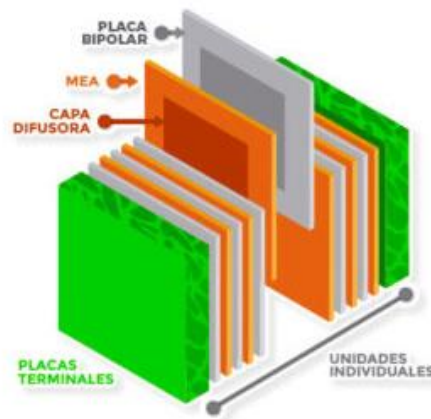


Figura 7. Esquema de construcció d'un electrolitzador PEM (ideagreen.es)

Element d'emmagatzematge

En quant a l'emmagatzematge de l'hidrogen produït, el mètode més eficient i econòmic són els dipòsits d'hidrogen comprimit. Com s'ha explicat anteriorment, aquests compten amb una àmplia experiència i redueixen, en comparació amb la resta de mètodes, els costos d'instal·lació i el manteniment.

Segons l'estudi de l'estat de l'art del dipòsits d'hidrogen comprimit, la opció més viable són els dipòsits de doble paret d'acer i polímer (malla de polietilè o nylon) coberta en una fibra

de grafit i reforç d'epoxi. Aquests tenen l'índex més baix de permeabilitat i per tant més alt de manteniment de la pressió del gas. L'únic inconvenient d'aquesta solució és la necessitat d'una sistema de compressió. Aquests sistemes tenen una demanda energètica de l'ordre de 2,6 kWh/kgH₂ i per tant s'haurà de tenir en compte en l'estudi energètic.

Existeixen diversos fabricants que, tot i les diferències en el procés de fabricació dels dipòsits, comparteixen els requisits de impermeabilitat i resistència mecànica.

Element de conversió

L'element de conversió, en aquest cas, serà l'element encarregat de reconvertir l'energia electroquímica de l'hidrogen i injectar-la a la xarxa de la universitat.

Tenint en compte els diferents arguments exposats en els anteriors apartats, la opció més viable són les piles de combustible. El funcionament d'aquestes piles, a diferència dels electrolitzadors, requereix d'un flux constant d'hidrogen per al seu funcionament, en aquest cas, provinent dels dipòsits d'hidrogen comprimit. Aquestes piles, degudament connectades, s'encarregarien de distribuir a través de la instal·lació elèctrica, el corrent generat en el procés de reconfiguració de l'hidrogen en aigua.



Figura 8, Pila de combustible (hidrogen)

5.3 Escenaris de consum d'hidrogen

Per al correcte anàlisi econòmic i energètic de la instal·lació i amb l'objectiu de descartar escenaris o apostes que poguessin esbiaixar els resultats de l'estudi, cal tenir en compte diferents escenaris en quant el consum de l'energia emmagatzemada en forma d'hidrogen.

Com a punt de partida prenem els següents escenaris:

- Consum en episodis de “no producció” per part de la instal·lació fotovoltaica.
- Consum en franges horàries “cares”¹⁰

Els diferents escenaris pretenen trobar la opció òptima sense descartar la instal·lació com a “no viable” si els resultats no són favorables. Cal valorar el fet de que la instal·lació no sigui capaç de suplir completament la demanda energètica dels edificis en tots els moments de “no producció”, és per això que s'inclou un segon escenari donat el context actual entorn les tarifes energètiques.

Aquesta segona opció, obra una porta a la viabilitat del projecte ja que els intervals “punta” podrien ser suplerts per l'hidrogen produït en altres franges.

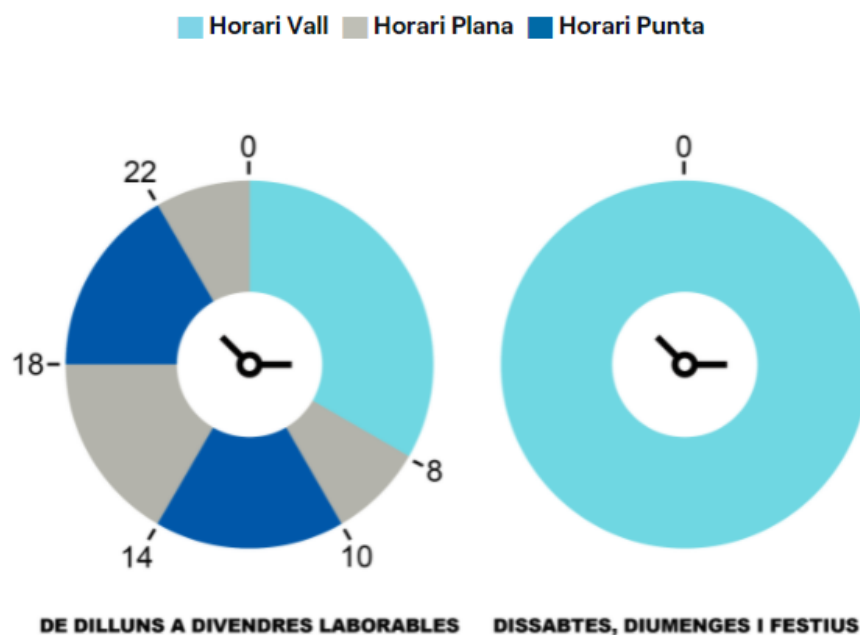


Figura 9. Divisió de franges horàries del preu de la llum¹¹

¹⁰ Aquest 2022, donades les oscil·lacions del preu de la llum les distribuïdores han optat per crear horaris en els quals canvia el preu de la llum, establint hores “punta”, “planes” o “vall” (cares, mitjanes, barates).

¹¹ ENDESA. (2021). Quins són els horaris de la llum? Blog d'Endesa. Darrera consulta 2 de gener de 2022, de <https://www.endesa.com/ca/blogs/blog-d-endsa/horaris-llum-vall-punta-pla>.

La figura 9, tot i representar a grans trets la situació actual del preu de la llum, no representa la tarifa de llum contractada per la universitat. A continuació, es fa un breu anàlisi de la tarifa actual.

La tarifa contractada pels edificis de FME, ETSAB, EPSEB i ETSEIB és una tarifa d'alta tensió (6.1A). Aquests tipus de tarifes tenen, com en el cas de la població general, diferents períodes, adaptats al consum de les entitats que les sol·liciten.

- P1: Gener, febrer, juny (del 16 al 30), juliol i desembre.
- P2: Gener, febrer, juny (del 16 al 30), juliol i desembre.
- P3: Març, juny (de l'1 al 15), setembre, novembre.
- P4: Març, juny (de l'1 al 15), setembre, novembre.
- P5: Abril, maig i octubre.
- P6: Gener, febrer, març, abril, maig, juny, juliol, agost, setembre, octubre, novembre i desembre.

Períodes tarifaris peninsulars de dilluns a divendres. Tarifes 6.1A													
Horari	Gener	Febrer	Marc	Abril	Maig	Juny (1-15)	Juny (16-30)	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
0:00 - 1:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
1:00 - 2:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
2:00 - 3:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
3:00 - 4:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
4:00 - 5:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
5:00 - 6:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
6:00 - 7:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
7:00 - 8:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
8:00 - 9:00	P2	P2	P4	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P4	P2
9:00 - 10:00	P2	P2	P4	P5	P5	P3	P2	P2	P6	P3	P5	P4	P2
10:00 - 11:00	P1	P1	P4	P5	P5	P3	P2	P2	P6	P3	P5	P4	P1
11:00 - 12:00	P1	P1	P4	P5	P5	P3	P1	P1	P6	P3	P5	P4	P1
12:00 - 13:00	P1	P1	P4	P5	P5	P3	P1	P1	P6	P3	P5	P4	P1
13:00 - 14:00	P2	P2	P4	P5	P5	P3	P1	P1	P6	P3	P5	P4	P2
14:00 - 15:00	P2	P2	P4	P5	P5	P3	P1	P1	P6	P3	P5	P4	P2
15:00 - 16:00	P2	P2	P4	P5	P5	P4	P1	P1	P6	P4	P5	P4	P2
16:00 - 17:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P1	P1	P6	P4	P5	P3	P2
17:00 - 18:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P1	P1	P6	P4	P5	P3	P2
18:00 - 19:00	P1	P1	P3	P5	P5	P4	P1	P1	P6	P4	P5	P3	P1
19:00 - 20:00	P1	P1	P3	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P3	P1
20:00 - 21:00	P1	P1	P3	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P3	P1
21:00 - 22:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P3	P2
22:00 - 23:00	P2	P2	P4	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P4	P2
23:00 - 0:00	P2	P2	P4	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P4	P2
Festius i caps de setmana	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6

Taula 7. Períodes tarifa 6.1A (Copiada de *Comunitat Energètica amb generació fotovoltaica al Campus Sud de la UPC (TFM)*, R. Gil, 2021)

Les diferents franges marquen el preu de compra de l'electricitat a xarxa amb els valors que es mostren a la figura 8.



Preus UPC per període [€/kWh]						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Gener	0,074313693	0,064474157	-	-	-	0,039400372
Febrer	0,0679708	0,05879735	-	-	-	0,034839404
Març	-	-	0,042641801	0,03509714	-	0,027734153
Abril	-	-	-	-	0,022437635	0,018411208
Maig	-	-	-	-	0,027867538	0,021026962
Juny	0,061268817	0,057109787	0,040938261	0,034105155	-	0,031002881
Juliol	0,090750029	0,081843545	-	-	-	0,050031909
Agost	-	-	-	-	-	0,050031902
Setembre	-	-	0,068133915	0,06191698	-	0,050031896
Octubre	-	-	-	-	0,063184693	0,055363718
Novembre	-	-	0,074525679	0,06827697	-	0,055363715
Desembre	0,097359153	0,088611657	-	-	-	0,055363701

Taula 8. Cost de l'electricitat per franges. (Copiada de *Comunitat Energètica amb generació fotovoltaica al Campus Sud de la UPC (TFM)*, R. Gil, 2021)

Com es pot observar, les franges horàries més cares coincideixen, en part, amb les hores de màxima producció de la planta fotovoltaica. Tot i això, l'emmagatzematge de l'energia en forma d'hidrogen donaria la capacitat de reduir la demanda a la xarxa elèctrica en els intervals on fos més convenient.

6. Anàlisi de dades

En aquest punt del projecte, s'analitzen les dades del consum elèctric dels edificis de la FME, l'EPSEB i l'ETSAB de l'any 2019 recollits per l'informe *Sirena* del mateix any, conjuntament amb les dades teòriques de generació de la instal·lació fotovoltaica.

6.1 Generació fotovoltaica

Existeixen diversos programes d'anàlisi de generació segons la localització de les plantes i el seu dimensionament. En el nostre cas i donat que l'objectiu d'aquest projecte no és el dimensionament de la planta fotovoltaica, optarem per l'ús de les dades generades a partir de l'estimació de generació de potència al projecte tècnic de la pròpia planta fotovoltaica.

Tot i la assumpció favorable del pronòstic de generació, val la pena fer-ne un petit anàlisi.

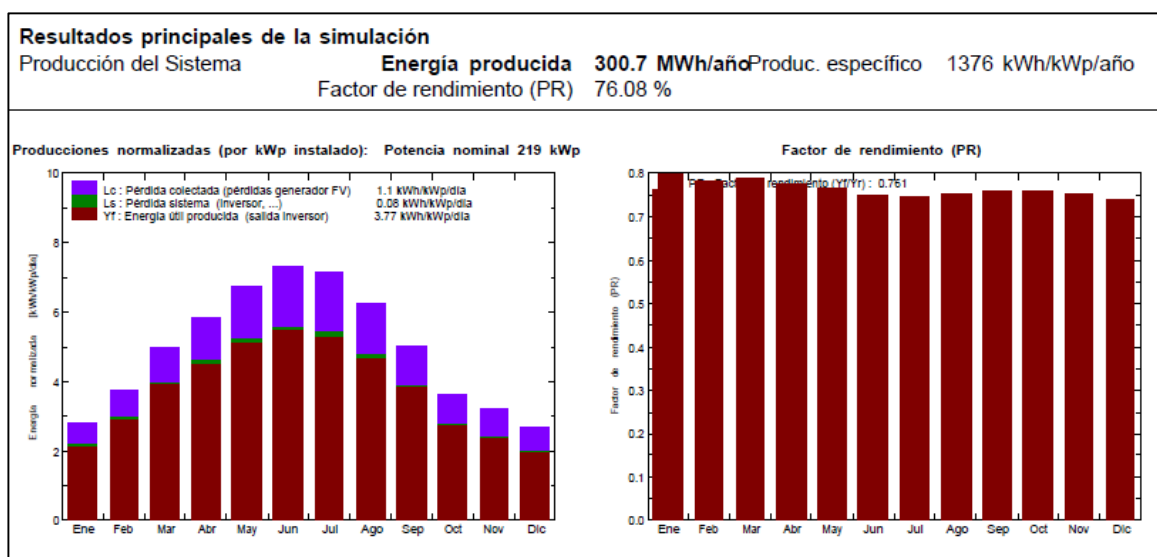


Figura 10. Diagrames de producció i factors de rendiment de la planta fotovoltaica per mesos naturals.

El gràfic al qual dedicarem més atenció és el primer gràfic (esquerra). Aquest representa una estimació de la producció energètica de la planta, representades per colors l'energia útil produïda (grana), les pèrdues energètiques del sistema (verd) i les pèrdues del generador fotovoltaic (lila), sent la suma dels tres l'energia total captada per les plaques. S'observa, com seria d'esperar, un pic als mesos de juny, juliol i agost, amb la respectiva davallada de la producció als mesos més fred de l'any. La gràfica està expressada amb una línia temporal

per mesos a l'eix de les abscisses i quilowatts hora per quilowatts pic¹² per dia normalitzats a l'eix de les ordenades, presentant l'energia disponible per al seu consum.

En quant a la segona gràfica (dreta), es mostren els factors de rendiment del sistema en una escala del zero (0) al u (1), essent u la captació d'energia del sistema en un dia sense núvol i de manera completament perpendicular a la tangent de les plaques.

A continuació es mostra una taula de valors també ordenada cronològicament per mesos.

670 mod (252+418 4 cores)
Balances y resultados principales

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
Enero	84.6	24.64	9.90	87.4	79.4	14.92	14.58	0.763
Febrero	84.0	33.76	10.30	104.9	96.3	18.36	17.97	0.783
Marzo	133.5	48.20	12.20	154.3	143.1	27.23	26.65	0.790
Abril	164.2	68.04	14.50	175.7	162.9	30.40	29.75	0.775
Mayo	203.2	78.34	17.30	207.9	192.8	35.56	34.79	0.766
Junio	220.0	73.87	22.20	219.9	204.5	36.85	36.04	0.750
Julio	218.7	77.86	24.90	220.9	205.1	36.84	36.03	0.746
Agosto	185.1	77.83	24.50	193.9	179.8	32.55	31.83	0.751
Septiembre	135.0	57.30	21.50	151.3	140.1	25.73	25.16	0.761
Octubre	95.6	48.64	18.70	112.9	103.6	19.15	18.71	0.758
Noviembre	71.7	27.13	13.60	96.1	87.1	16.15	15.79	0.752
Diciembre	58.6	22.72	10.60	82.7	74.3	13.68	13.37	0.740
Año	1634.2	638.32	16.72	1807.9	1669.2	307.43	300.66	0.761

Leyendas: GlobHor Irradiación global horizontal GlobEff Global efectivo, corr. para IAM y sombreados
 DiffHor Irradiación difusa horizontal EArray Energía efectiva en la salida del generador
 T Amb Temperatura Ambiente E_Grid Energía reinyectada en la red
 GlobInc Global incidente plano receptor PR Factor de rendimiento

Taula 9, Balanços i producció de la planta fotovoltaica per mesos naturals.

De la taula 9, ens centrarem en la sisena columna "E_Grid (MWh)". Aquesta columna defineix la potència a la sortida del generador de la planta fotovoltaica, potència de la qual partiran els nostres càlculs de viabilitat del sistema. D'aquesta taula, se'n poden extreure també les xifres exactes de la simulació (irradiació global i difosa, temperatura ambient, etc.) i els resultats mensuals (energia efectiva, reinjectada a la xarxa i factor de rendiment).

Paral·lelament, el propi programa de simulació analitza les pèrdues al llarg del sistema de la planta fotovoltaica com es mostra a la figura 11.

Per tant, prendrem com a energia disponible per al seu ús l'energia reinjectada a la xarxa (300.7MWh anuals).

¹² Quilowatts pic, Unitat de mesura que especifica la capacitat d'un sistema fotovoltaic per generar energia al seu punt de màxim rendiment.

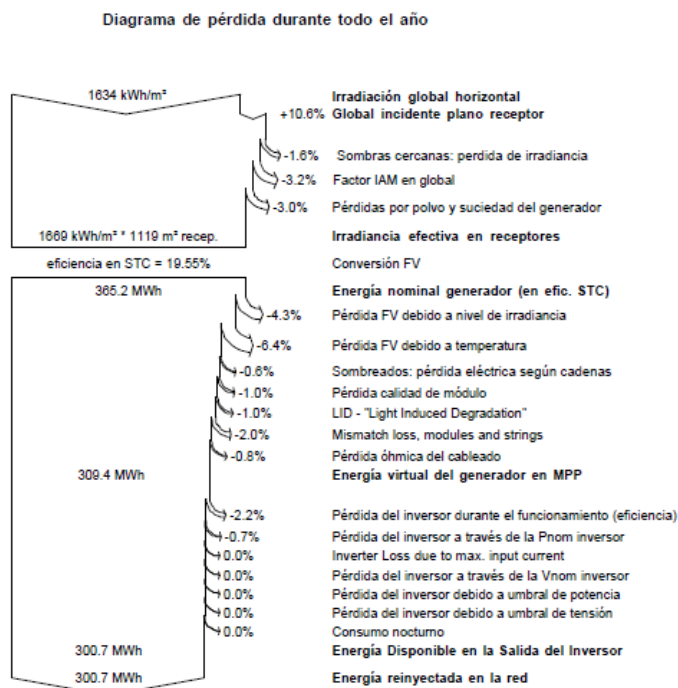


Figura 11, Diagrama de pèrdues energètiques anuals.

6.2 Demanda energètica

Per tal de estudiar la viabilitat d'una possible instal·lació d'emmagatzematge i reaprofitament d'hidrogen, cal primer conèixer la demanda de consum elèctric dels diferents edificis. Per a poder realitzar una aproximació de la demanda anual dels edificis, es treballa amb les dades obtingudes pel *Sirena*, la plataforma de Dexma¹³ que utilitza la UPC. Aquesta plataforma permet analitzar els consums, costos i evolucions dels diferents consums energètics de les escoles en intervals de fins a 15 minuts d'exactitud.

Com a dades d'estudi, es prenen les dades anuals de l'any 2019, ja que donada la situació de pandèmia descarta l'any 2020 com a any significatiu en la demanda energètica de les escoles. En les figures X, Y i Z es mostra el consum anual dels edificis de la FME, l'EPSEB i l'ETSAB respectivament.

Arrel d'una inspecció preliminar de les gràfiques estadístiques, s'observa un clar patró en les figures 12, 13 i 14. Queda clarament marcat el calendari acadèmic, tenint una significativa disminució en les primeres setmanes d'abril, els mesos d'estiu i els mesos de nadal. Al llarg de l'any, s'observen també segments d'elevat consum seguits de clares baixades de consum, associades als caps de setmana quan les escoles estan tancades.

¹³ DEXMA, Plataforma de gestió energètica orientada a consumidors i comercialitzadores.

Marcada en negra, en tots tres gràfics, trobem la línia de tendència de les corbes de consum. Partint d'aquestes, s'observa que els edificis de la FME i l'ETSAB són els equipaments amb una major demanda energètica al llarg de tot l'any.

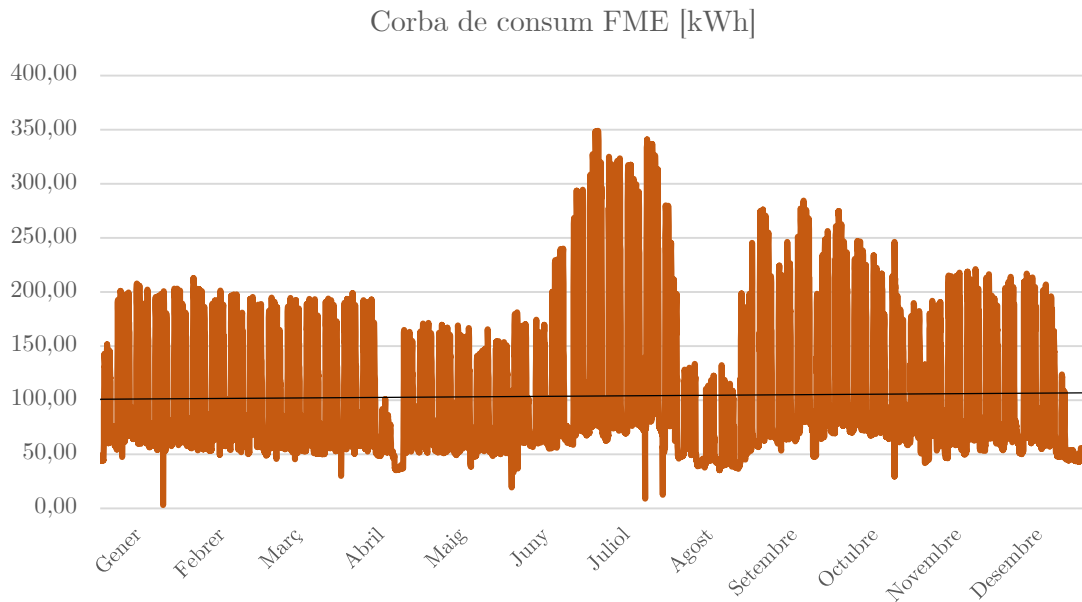


Figura 12. Corba de consum FME (2019)

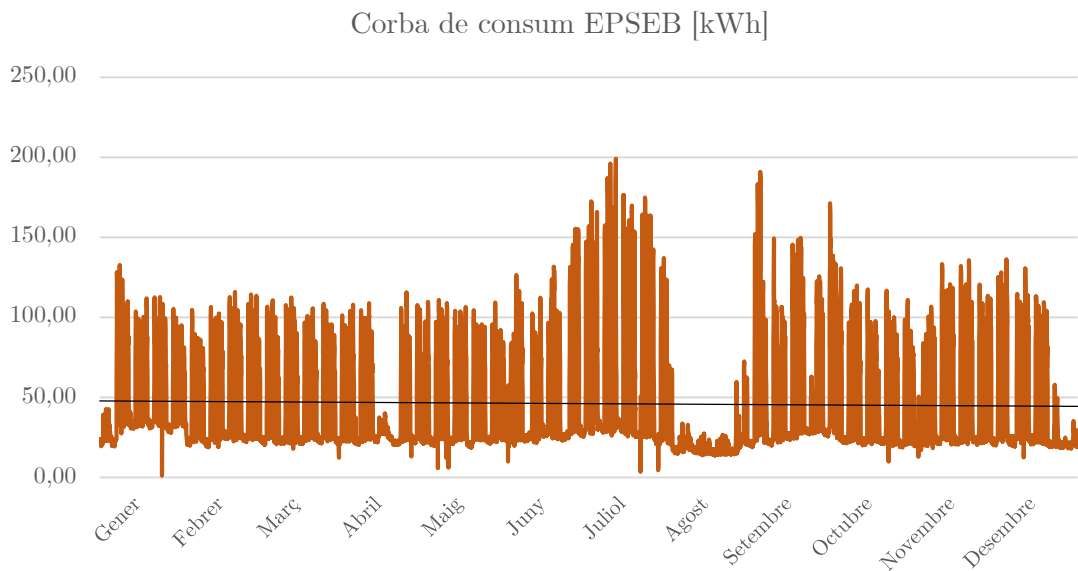


Figura 13. Corba de consum EPSEB (2019)

Com es pot observar, l'edifici amb una demanda clarament més baixa és l'EPSEB, amb una mitjana propera als 50 kWh, que es desmarca de la FME i l'ETSAB que tenen una mitjana aproximada de 100kWh ambdues.

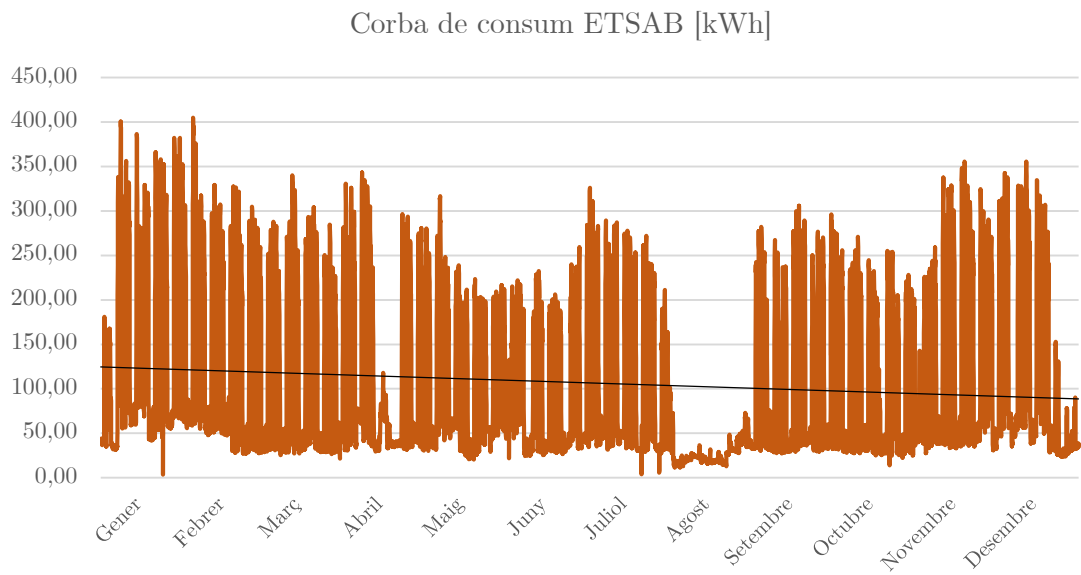


Figura 14. Corba de consum ETSAB (2019).

Comparant les dades de generació de la planta fotovoltaica amb la demanda mensual del Campus Sud (FME, EPSEB i ETSAB), es desenvolupa la següent gràfica:

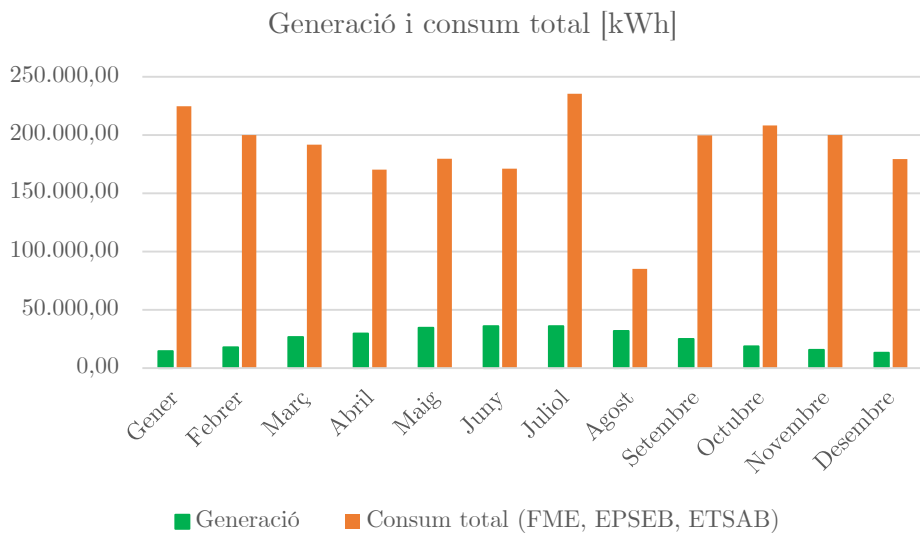


Figura 15. Comparació de generació i consum total (FME, EPSEB, ETSAB)

Com es pot observar, la generació simulada representa els percentatges de la figura 15 respecte la demanda mensual.

Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
6,49	8,99	13,90	17,46	19,35	21,04	15,31	37,40	12,59	8,98	7,89	7,45

Taula 10. Percentatge de generació front el consum

Com es pot observar a les gràfiques de generació i consum, la generació està sempre per sota de la demanda dels edificis, és per això que es descarta la possibilitat d'abastir als tres edificis, ja que aleshores no hi hauria excedent. Com marca el projecte executiu, la planta fotovoltaica està dimensionada de manera que pugui subministrar la FME i repartir l'excedent entre la resta d'edificis i, en intervals d'alta generació, arribar a vendre l'excedent restant a la xarxa.

La comparació de generació amb el consum de la FME es mostra a la figura 16.

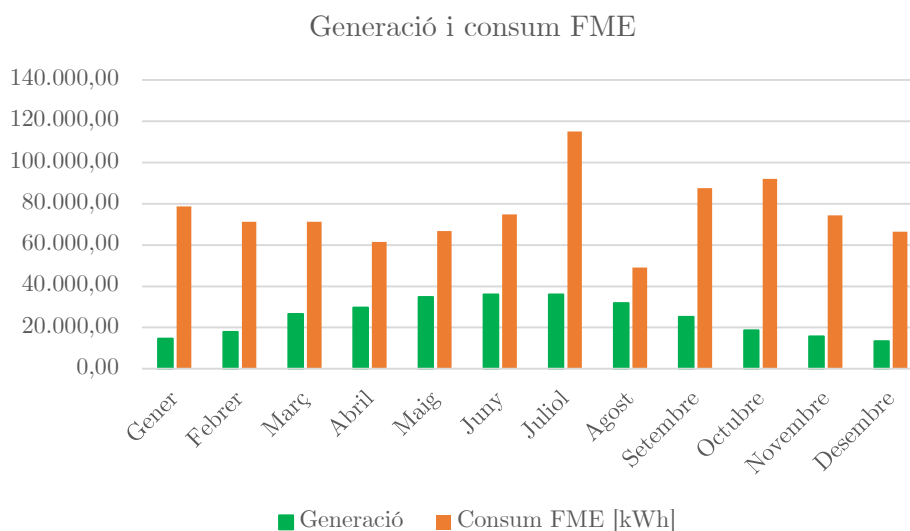


Figura 16. Generació i consum FME

Com es pot observar, la generació segueix per sota de la corba de consum de l'edifici de matemàtiques, però analitzant la generació horària, podem observar que en determinats períodes, la corba de generació estaria per sobre de la de consum com es mostra a la figura 17.

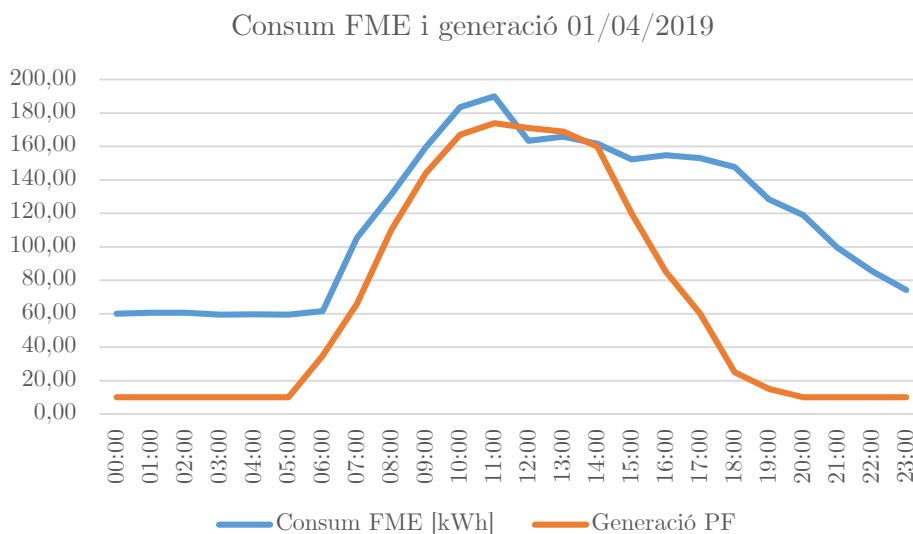


Figura 17. Generació i Consum FME (01/04/2019)

Afegit a l'excedent esmentat, existeix el període dels caps de setmana on la demanda energètica és quasi nul·la i la producció, per contrari, es manté en els estàndards diaris. L'excedent pertanyent a aquestes franges es mostra a la figura 18.

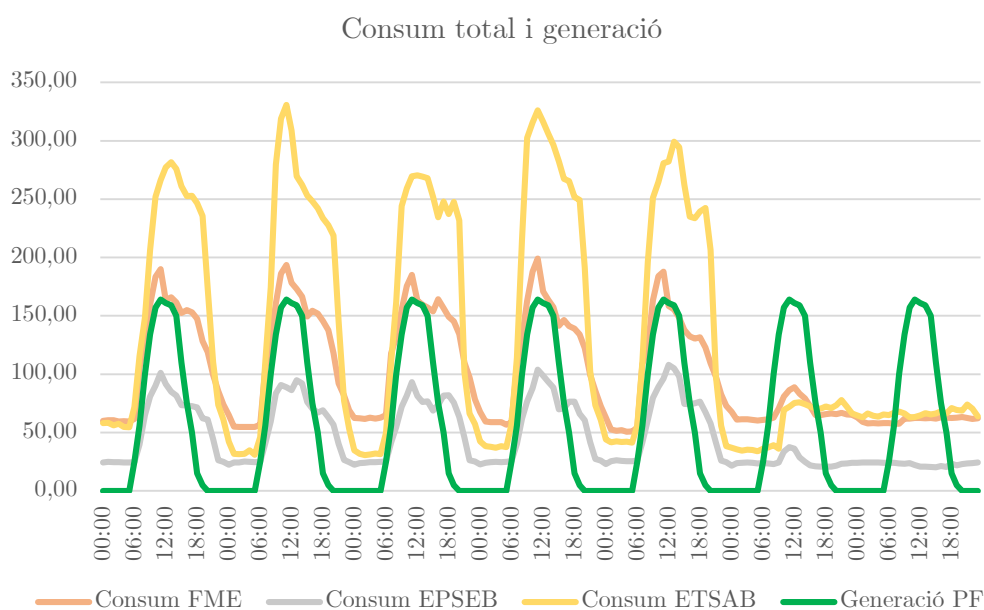


Figura 18. Consum total i generació setmanal

Per facilitar els càlculs, es partirà del supòsit de que totes les setmanes del curs escolar (exceptuant festius) tenen un consum igual podent així, prendre les dades de consum de qualsevol de les setmanes lectives de l'any. Aquest supòsit a l'hora, compensa la major

demanda de l'hivern amb la disminució de l'estiu derivades de la demanda energètica dels equips de calefacció dels edificis.

Com es pot observar, el consum en els dies festius (cap de setmana) no és del tot nul però sí que la instal·lació genera un excedent per sobre del consum de les escoles.

6.3 Capacitat de generació de l'electrolitzador

Amb les infraestructures ja proposades, l'anàlisi restant és el de la capacitat de generació d'hidrogen per part de la instal·lació d'estudi.

Les dades de les quals partirem seran les d'excendent energètic produït en cap de setmana. Aquesta proposta rau en dos pretextos: l'excendent produït al llarg de la setmana en dies laborals/lectius no és suficient per cobrir les necessitats dels edificis i la instal·lació d'hidrogen a l'hora, la integritat dels caps de setmana tenen un cost energètic de xarxa "vall" (baix) i per tant, usar electricitat de xarxa als edificis i dedicar el 100% de la producció a la planta d'hidrogen no tindria un gran cost econòmic.

En aquest estudi, l'únic factor limitant és l'energia elèctrica, doncs prenem l'aigua i l'aire o oxigen com a fonts infinites en el subministre.

Fent un càlcul de l'àrea inferior a la corba de generació diària de la planta fotovoltaica mitjançant el càlcul d'àrees amb la regla trapezoïdal, obtenim els següents resultats:

Nº dies	Generació [kWh]
1	1.361,00
2	2.722,00

Taula 11. Generació elèctrica en cap de setmana.

Donada la manca d'exemples i projectes amb suficients similituds al nostre, prendrem les dades de consum i generació publicades per la Fundació Naturgy¹⁴ al llibre "*Hidrogeno. Vector energético de una economía descarbonizada (Morante et al., 2020)*" en quant a eficiència de les tecnologies de l'hidrogen.

¹⁴ NATURGY, Empresa distribuïdora energia. (<https://www.naturgy.es/hogar>)

Producción de hidrógeno vía electrólisis PEM			actual	2024	2030
Sistema genérico					
1	Consumo eléctrico a capacidad nominal	kWh/kg	55-70	52	50
2	Coste capital	€/kW	1.200-2.000	700	500
3	Costes de O&M	€/(kg/día)/año	58	30	21
Sistema específico					
4	Tiempo de rampa inactiva en caliente	seg	10	1	1
5	Tiempo de rampa de arranque en frío	seg	120	10	10
6	Espacio requerido	m ² /MW	120	80	45
Stack					
7	Tasa de degradación	%/1.000 h	0,250	0,125	0,12
8	Densidad de corriente	A/cm ²	2,0	2,4	2,5
9	Uso de materias primas críticas como catalizadores del grupo platino	mg/W	5,0	1,25	0,4
10	Uso de materias primas críticas como catalizadores Pt	mg/W	1,0	0,4	0,1

Taula 12. KPI's de tecnologies d'electròlisi PEM (*H. Europe, Strategic Research and Innovation Agenda, 2019*).

A la taula 12, trobem el consum elèctric d'un electrolitzador per kg d'hidrogen produït (1), el cost capital (2) i els costos d'operació i manteniment. A aquestes dades se'ls han de sumar els diferents consums que requerirà la infraestructura de la instal·lació (sistema de compressió, sistemes de control, etc.). Tenint en compte les diferents demandes energètiques, desenvolupem els resultats exposats a la taula 13.

Nº dies	Generació [kg H ₂]
1	21,776
2	43,552

Taula 13. Generació d'hidrogen per dies.

7. Estudi energètic

Aquest punt analitza la viabilitat energètica de la implementació de la instal·lació d'hidrogen en el context del Campus Sud. Partint de les dades teòriques de producció potencial d'hidrogen, es procedeix a fer un còmput global dels estalvis energètics que generaria la proposta.

7.1 Estalvis

Els estalvis energètics de la proposta deriven directament de la quantitat d'hidrogen potencial produït i la capacitat d'emmagatzemar-la per a la posterior conversió, mitjançant piles d'hidrogen, en electricitat injectada a xarxa.

Forma de almacenamiento	Densidad energética		Densidad kg m ⁻³
	kJ kg ⁻¹	MJ m ⁻³	
Hidrógeno gas (ambiente 0,1 MPa)	120.000	10	0,090
Hidrógeno gas a 20 MPa	120.000	1.900	15,9
Hidrógeno gas a 30 MPa	120.000	2.700	22,5
Hidrógeno líquido	120.000	8.700	71,9

Taula 14, Densitat energètiques de l'hidrogen per pressions (*H. Europe, Strategic Research and Innovation Agenda, 2019*).

Prenen les dades de l'apartat 6.3, i tenint en compte les densitats energètiques de l'hidrogen de la taula 14, s'obté en la següent equació:

$$E = (\rho * H) * f - (e_p + e_o) * H \quad (11)$$

E = Energia injectada a la xarxa (kWh)

ρ = Densitat energètica de l'hidrogen a 30MPa (kJ*kg⁻¹).

H = Hidrogen produït (kg).

e_p = Energia consumida de compressió (kWh*kgH₂⁻¹).

e_o = Energia d'operació (kWh* kgH₂⁻¹).

f = Factor de conversió kJ-kWh (0.00027778 kJ/kWh).

Prenent l'hidrogen produït en un dia festiu (H = 21,776 kgH₂) i la densitat a 300 bar (ρ = 120.000 kJ*kg⁻¹), l'energia consumida de compressió per quilogram d'hidrogen (e_p = 2,6 kWh/kgH₂), l'energia mitja d'operació (e_o = 0,05 kWh/kgH₂) i el factor de conversió obtenim:

$$E = 668,17 kWh$$

El resultat es tradueix en la energia a emmagatzemar, en forma d'hidrogen comprimit, per a un ús futur.

8. Estudi econòmic

En aquest punt es calculen els estalvis generats per la conversió d'hidrogen en energia elèctrica havent fet un previ estudi dels estalvis generats per la pròpia producció de la planta fotovoltaica.

El projecte de la planta fotovoltaica manté la contractació elèctrica actual de les escoles ja que la generació de la planta fotovoltaica . Amb l'estudi econòmic d'aquest projecte, es pretén analitzar si l'hidrogen tindria la capacitat de suplir aquests buits de generació i/o substituir el consum de la xarxa en les franges més cares.

8.1 Estalvis econòmics

Els estalvis generats per la proposta d'estudi provenen de l'ús de l'hidrogen com a substitució del consum elèctric a xarxa. L'ús d'energia elèctrica generada per l'electròlisi es compara amb la opció presentada pel projecte executiu de la planta fotovoltaica de venda a xarxa.

El preu de venda a xarxa, actualment, oscil·la entre els 0.04 i els 0.05 €/kWh per tant prendrem 0.045 com a preu de venda mitjà. Aquest preu, és significativament superior al cost econòmic de l'electricitat consumida a xarxa (de l'ordre d'un 1000% superior), per tant, com a anàlisi preliminar podem avançar que a nivell econòmic pot tenir viabilitat.

Partint de l'escenari de producció d'hidrogen únicament en cap de setmana, com s'ha proposat al punt 7, la producció d'hidrogen per dia obtinguda es tradueix en, segons les equacions 12 i 13 en els valors exposats a la taula 15.

$$PC = E * \frac{0.35 \text{ (preu mitjà de compra del kWh [€])}}{H} \quad (12)$$

$$PV = E * \frac{0.045 \text{ (preu mitjà de venda del kWh [€])}}{H} \quad (13)$$

Preu de compra [€/kgH ₂ ⁻¹]	10,74
Preu de venda [€/kgH ₂ ⁻¹]	1,38

Taula 15. Preus de compra i venda de l'hidrogen generat.

El preu de compra (PC) representa el cost de l'equivalent en electricitat de xarxa dels kWh generats per l'ús de l'hidrogen (prenent 0.035 com a preu mitjà del kWh a la xarxa elèctrica). El preu de venda (PV), representa el valor econòmic de la venda dels mateixos kWh. Analitzant els resultats obtinguts, observem una diferència del 1000% entre el valor de compra i el de venda dels mateixos quilowatts hora.

8.2 Estudi per escenaris

Tot i la clara diferència entre els beneficis de la venda a xarxa i l'autoconsum, existeix una altra variable: la franja horària del consum o de la venda.

Com s'ha explicat en punts anteriors, donat l'augment del preu de la llum, les distribuïdores han optat per la creació de franges amb diferència de preu. Amb aquesta diferència, es crea un marge de guany en l'autoconsum. Per a l'estudi d'aquesta variable es partirà de la premissa de que "surts més a compte econòmicament consumir hidrogen en les franges més cares". Per tant, es considera que, per tal d'estalviar al màxim a nivell econòmic, l'hidrogen emmagatzemat s'utilitzarà únicament en las franges "punta" de la setmana quan la diferència entre el preu de compra i venda és més gran.

8.3 Inversió inicial

Donada la manca d'experiències semblants al cas d'estudi, no podem més que aproximar els costos de la inversió inicial.

Fent una recerca de referències de projectes entorn les tecnologies de l'hidrogen acceptats per l'administració amb els seus pressupostos pertinents, trobem els següents projectes [5]:

- H2PORTS (Port de València), Realització d'estudis de viabilitat per al desenvolupament d'una cadena de subministre d'hidrogen sostenible al port per reduir l'impacte ambiental de les seves operacions. Construcció d'una hidrogenera a 250bars de pressió i desenvolupament de la logística de subministre al Port. Pressupost: 4 milions d'euros.
- GREEN HYSLAND (Mallorca): Producció d'hidrogen renovable i utilització en mobilitat i usos tèrmics en un sistema energètic extrapeninsular. Construcció d'una instal·lació d'electròlisi de 7,5MW a partir de generació elèctrica fotovoltaica dedicada. Pressupost: 50 milions d'euros.

Aquestes opcions estan allunyades del nostre context ja sigui per la seva magnitud o per la seva funcionalitat final, però a través de diferents documents redactats per la Taula de l'Hidrogen de la generalitat de Catalunya podem determinar a grans trets els costos dels equips [6].

Prenent els diferents projectes i experiències recollides, no es pot fixar un preu exacte de la instal·lació d'hidrogen i per tant, la inversió inicial s'aproxima a 400.000€.

Per molt que el preu estimat estigués significativament esbiaixat, l'índex de retorn d'una instal·lació de les característiques projectades seria superior als 20 anys, fet que l'allunya de la viabilitat econòmica desitjada.

9. Impacte ambiental

En aquest capítol s'exposen les emissions de CO₂ estalviades tant per la planta fotovoltaica com per la instal·lació de generació d'hidrogen així com l'impacte visual i acústic del projecte.

9.1 Emissions de CO₂

Prenent les dades de l'informe SIRENA 2020, podem observar l'evolució de les emissions de CO₂ dels diferents edificis del Campus Sud a la figura 18, sent aquests el punt de partida de l'estudi de l'impacte ambiental del projecte.

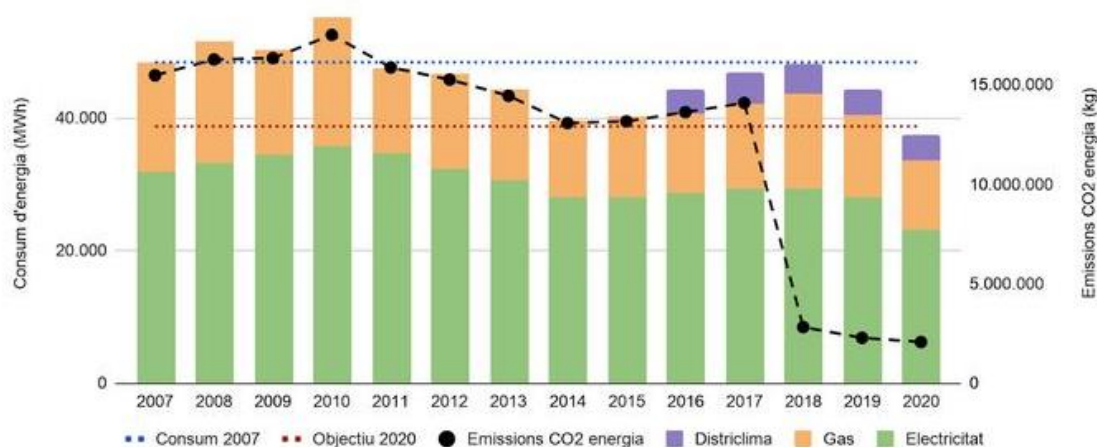


Figura 19. Evolució del consum d'energia i emissions de CO₂

A la gràfica es pot veure una clara davallada l'any 2018, associada a la compra d'energia 100% renovable, amb garantia d'origen. Des d'aleshores, hi ha una disminució anual en concordança amb el compromís per una UPC sostenible.

La taula 14 representa l'estalvi d'emissions de CO₂ segons les simulacions fetes pel projecte executiu de la planta fotovoltaica.

Planta	Emissions de CO ₂ evitades [kg]
FME	108.238,00
Generació d'hidrogen	300,67

Taula 16. Emissions de CO₂ evitades.

Per altra banda, les emissions de CO₂ evitades per l'ús de l'hidrogen emmagatzemat s'obté amb el mateix sistema que el de l'electricitat de xarxa.

9.2 Impacte ambiental visual i acústic

En quant a l'impacte ambiental visual, les diferents opcions sobre les quals s'ha realitzat l'estudi, es comercialitzen en forma de contenidor marítim, minimitzant l'impacte a la vista i camuflant-se en àmbits industrials o tecnològics.

Pel que fa a l'impacte ambiental acústic, la instal·lació només tindria un cert impacte en les hores de funcionament (caps de setmana prenent l'escenari escollit), per tant es pot considerar quasi nul.



Figura 20, Instal·lació electrolitzadora comercialitzada per AVICRYO (AVICRYO, 2021, <https://es.avicryo.com/>).

Conclusions

La hipòtesi de partida del treball es basa en la possibilitat d'instal·lar un sistema de generació d'hidrogen (producció, emmagatzematge i ús) que, a partir de l'excedent generat per la planta fotovoltaica de la FME, pogués abastir a diferents edificis del Campus Sud (FME; EPSEB, ETSAB). A través de l'anàlisi del context energètic i tecnològic actual s'ha estudiat la viabilitat d'aquesta proposta.

Tot i l'extens volum d'informació i estudi entorn aquests tipus de tecnologies, emergents encara, la proposta constava de diferents dificultats, com per exemple la manca d'experiències de les tecnologies de l'hidrogen a tant petita escala i els elevats costos econòmics i energètics que resulten d'aquesta manca d'experiència. Al llarg d'aquest treball s'han explorat les diverses tecnologies a l'abast i donada la baixa producció de la planta fotovoltaica i el cost econòmic de la infraestructura, es conclou amb que una instal·lació d'hidrogen, actualment, no seria viable en el context de la UPC.

Les dades de consum dels edificis fan que, amb la planta fotovoltaica acceptada per a l'edifici de la FME, no es pugui abastir els diferents edificis del Campus Sud i encara menys una planta de generació d'hidrogen amb tot el cost d'operació i manteniment que aquest comportaria.

Aquest projecte pretenia trobar la solució tecnològica més viable per a la situació, en aquest cas es conclou que és clar que, en el context de producció intermitent lligat a les plantes fotovoltaïques, els electrolitzadors de membrana polimèrica són la via a seguir.

Malgrat el resultat de viabilitat final, cal posar en valor la importància d'aquests tipus de projectes entorn l'hidrogen. Aquest document és un exemple de les dificultats que encara hi ha en el desenvolupament d'aquest sector tot i les diferents iniciatives estatals o internacionals.

Per finalitzar les conclusions, s'obra a consideració la necessitat de futurs projectes que contemplin aquesta instal·lació i els seus costos amb diferents estratègies tant energètiques, tecnològiques o econòmiques (flexibilització de càrregues, alternatives d'emmagatzematge, etc.).

Pressupost

Per al càlcul del pressupost total del projecte, es comptabilitzen tots els recursos utilitzats.

Material d'oficina

El material d'oficina utilitzat per a la confecció d'aquest projecte es redueix principalment a l'ordinador portàtil amb el qual s'han fet les simulacions i el material fungible utilitzat. Donat que l'ordinador es podrà fer servir en futures ocasions, es contemplarà únicament un cost d'amortització del 10%

Concepte	Cost	Amortització	Total
HP Pavilion (2015)	689,50 €	10%	68,95 €
Material fungible	20 €	-	20,00 €
TOTAL			88,95 €

Taula 17. Cost material d'oficina

Llicències de programari

Per a la realització de l'estudi de viabilitat s'ha utilitzat diversos programes en concepte de confecció del propi document i de l'estudi pròpiament.

La simulació de l'energia captada per la planta fotovoltaica s'ha fet el programa PVSol. En el nostre cas, s'ha utilitzat la versió de prova (límit de 30 dies), però es recomana treballar amb la versió complerta. Per altra banda, s'han utilitzat els programes *Microsoft Word* i *Microsoft Excel* del paquet Office. Els costos totals de programari es mostren a la taula 18.

Concepte	Cost	Amortització	Total
PVSol	1080 €	25%	270,00 €
Pack Office	579€	10%	57,90€
TOTAL			327,90 €

Taula 18. Cost llicències de programari.

Cost de personal

A la taula 19, s'hi mostra el cost total de les hores invertides en el projecte. El preu per hora es fixa a 20 €/h.

Concepte	Preu/hora	Hores	Total
Investigació	20 €/h	100 h	2.000 €
Simulació	20 €/h	50 h	1.000 €
Redacció	20 €/h	50 h	1.000 €
TOTAL			4.000 €

Taula 19. Cost de personal.

Cost total

El balanç total per a la confecció d'aquest document és de QUATRE MIL QUATRE-CENTS SETZE EUROS AMB VUITANTA-CINC CÈNTIMS (4.416,85 €).

Concepte	Total
Material d'oficina	88,95 €
Llicències de programari	327,90 €
Personal	4.000,00 €
TOTAL	4.416,85 €

Taula 20. Cost total.

Agraïments

Agraïixo en primer lloc al meu tutor per l'agilitat en els "tempos" i el suport al llarg del projecte.

Als meus amics i amigues per recolzar-me durant aquests anys a l'ETSEIB.

A la meva família per, no només evitar que llencés la tovallola, sinó per encoratjar-me a seguir treballant fins el final.

Bibliografia

- [1] Gupta, Ram B. (2008) Hydrogen Fuel.m Production, Transport and Storage. CRC Press.
- [2] HyWAYS. (2008, març). The European hydrogen roadmap.
<https://data.europa.eu/doi/10.2777/35839>
- [3] Hydrogen Analysis Resource Center. (2020, juny). Worldwide Captive Hydrogen Production Capacity at Refineries.
<https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/refinery-captive-purpose-hydrogen-production-capacities-state>
- [4] Institut Català d'Energia. (2021, juny). Pacte Nacional per a la Transició Energètica d Catalunya.
http://icaen.gencat.cat/ca/plans_programes/transicio_energetica/
- [5] HyLAW. (2018, setembre). Informe de Recomendaciones Legislativas para el Sector del Hidrógeno en España.
https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2018-09/HyLAW_%20National%20policy%20Paper_ES.PDF
- [6] Ministerio para la transición energética y el reto demográfico. (2020, juliol). Hoja de Ruta del Hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable. Gobierno de España.
- [7] Institut Català d'Energia. (2021, setembre). IS1.7 - Emmagatzematge d'hidrogen de petita capacitat. Generalitat de Catalunya.
- [8] Pineda Erice, D. A. (2009, marzo). Evaluación técnico económica de una planta de producción de hidrogeno mediante electrólisis de agua utilizando energia eléctrica producida con celdas fotovoltaicas de alta eficiencia. (TFM).
- [9] Gil, R (2021, juny). Comunitat energètica amb generació fotovoltaica al Campus Sud de la UPC (TFM).