

**Gran en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica**

**ESTUDI DE VIABILITAT D'UN SISTEMA D'EMMAGATZEMATGE D'ENERGIA  
RENOVABLE MITJANÇANT HIDROGEN EN UN HABITATGE**

**Memòria**

**GUILLEM AYATS SÁNCHEZ**

**PONENT: VIRGINIA ESPINOSA DURÓ**

**CURS 2018/2019**



## **Agraïments**

Vull donar-li les gràcies a la Mariana ajudar-me a revisar el projecte i animar-me en els moments més tensos.

A la Virgínia per haver confiat en mi per realitzar aquest projecte, la seva ajuda i els seus ànims durant el curs.

Als meus professors per guiar-me i transmetre'm el seu coneixement durant aquests quatre intensos anys

I, finalment, als meus pares per fer-me sempre costat.



## **Resum**

En aquest projecte s'ha realitzat un estudi de l'estat de l'art de l'energia d'hidrogen amb l'objectiu d'obrir un nou camp d'estudi dins de l'àrea de recerca de sostenibilitat del grup de recerca FI4 del Tecnocampus. A partir de l'estudi de l'estat de l'art s'ha fet un disseny preliminar d'un sistema d'acumulació d'energia renovable en forma d'hidrogen en un habitatge, una simulació del seu funcionament i un estudi econòmic. El resultat obtingut és que, actualment, el sistema no és viable a nivell energètic ni econòmic, no complint tampoc amb el marc legislatiu vigent.

## **Resumen**

En este proyecto se ha realizado un estudio del estado del arte de la energía de hidrogeno con el objetivo de abrir un nuevo campo de estudio dentro del área de investigación de sostenibilidad del grupo de investigación FI4 Tecnocampus. A partir del estudio del estado del arte se ha hecho un diseño preliminar de un sistema de acumulación de energía renovable en forma de hidrógeno en una vivienda, una simulación de su funcionamiento y un estudio económico. El resultado obtenido es que, actualmente, el sistema no es viable a nivel energético ni económico, no cumpliendo tampoco con el marco legislativo vigente.

## **Abstract**

In this project, a study of the state of the art of hydrogen energy has been carried out in order to open a new field of study within the FI4 research group's sustainability area of the Tecnocampus. From the study of the state of the art, a preliminary design of a renewable energy hydrogen accumulation system in a home has been done, a simulation of its operation and an economic study. The result is that, at present, the system is not feasible at an energy or economic level, nor does it comply with the current legislative framework.



# Índex

Índex de figures .....	V
Índex de Taules .....	IX
Glossari de termes .....	XI
Glossari d'acrònims.....	XIII
Relació de lleis, normes i reglaments.....	XV
1. Objectius.....	1
1.1. Propòsit.....	1
1.2. Finalitat.....	1
1.3. Objecte.....	1
1.4. Abast.....	1
1.5. Context en les línies de recerca del Tecnocampus .....	1
2. Introducció.....	3
2.1. Objecte.....	3
2.2. Revisió d'antecedents .....	3
2.3. Necessitats d'informació .....	4
2.4. Abast.....	4
3. Objectius de detall i especificacions tècniques .....	5
4. Marc conceptual .....	7
4.1. Hidrogen .....	8
4.1.1. La molècula d'H <sub>2</sub> com a portador energètic.....	9
4.1.2. Economia d'hidrogen .....	9
4.1.3. Seguretat.....	10
4.2. Termodinàmica en reaccions electroquímiques .....	12

## II

4.2.1. Entalpia (H).....	12
4.2.2. Entropia (S).....	13
4.2.3. Energia Lliure de Gibbs (G) .....	14
4.2.4. Voltatge d'una cel·la electroquímica .....	14
4.2.5. Eficiència d'una cel·la electroquímica.....	16
4.3. Cinètica de les reaccions electroquímiques.....	16
4.4. Electròlisi d'aigua .....	16
4.4.1. Termodinàmica de l'electròlisi .....	18
4.4.2. Sistema per a l'electròlisi.....	19
4.5. Emmagatzematge de l'hidrogen.....	20
4.5.1. Emmagatzematge en forma gasosa .....	21
4.6. Pila de combustible d'hidrogen.....	22
4.6.1. Termodinàmica de la pila d'hidrogen .....	23
4.6.2. Pèrdues en una pila .....	24
4.6.3. Tipus de piles de combustible.....	24
4.6.4. Sistema per al funcionament de la pila d'H <sub>2</sub> .....	30
5. Descripció detallada de la solució tècnica .....	31
5.1. Justificació de les eleccions tecnològiques .....	31
5.2. Introducció a la solució tècnica.....	32
5.3. Estatus normatiu del sistema .....	33
5.3.1. Producció d'hidrogen mitjançant electròlisi d'aigua .....	34
5.3.2. Emmagatzematge d'hidrogen .....	34
5.3.3. Piles de combustible .....	34
5.4. Descripció general del sistema.....	35
5.4.1. Subsistema d'electròlisi .....	35
5.4.2. Subsistema d'emmagatzematge d'H <sub>2</sub> comprimit.....	38



5.4.3. Subsistema de pila de combustible.....	39
5.4.4. Subsistema de gestió tèrmica .....	41
5.4.5. Subsistema de ventilació .....	42
5.4.6. Subsistema de control i adquisició de dades .....	42
5.4.7. Instal·lació fotovoltaica.....	42
5.4.8. Llistat de components del sistema.....	44
5.4.9. Justificació de les eleccions en relació a la topologia del sistema .....	46
5.5. Metodologia.....	47
5.6. Resultats de la simulació i dimensionament dels components principals .....	50
5.6.1. Resultats de gener.....	53
5.6.2. Resultats de febrer .....	54
5.6.3. Resultats de març .....	55
5.6.4. Resultats d'abril.....	56
5.6.5. Resultats de maig .....	57
5.6.6. Resultats de juny .....	58
5.6.7. Resultats de juliol .....	59
5.6.8. Resultats d'agost .....	60
5.6.9. Resultats de setembre .....	61
5.6.10. Resultats d'octubre.....	62
5.6.11. Resultats de novembre .....	63
5.6.12. Resultats de desembre .....	64
5.6.13. Anàlisi dels resultats.....	65
6. Planificació.....	67
6.1. Planificació inicial .....	67
6.2. Execució .....	71
6.3. Desviacions.....	73

7. Impacte mediambiental .....	75
7.1. Emissions evitades .....	75
7.2. Consum d'aigua.....	76
8. Conclusions .....	77
9. Referències .....	79

## Índex de figures

Fig. 4.1. Esquema simple del sistema.....	7
Fig. 4.2. Esquema simple del sistema amb cogeneració. ....	7
Fig. 4.3. Esquema senzill d'una cel·la electrolítica. ....	17
Fig. 4.4. Topologia 1 per al sistema de complet per a l'electròlisi. ....	19
Fig. 4.5. Topologia 2 per al sistema complet de l'electròlisi.....	19
Fig. 4.6. Esquema senzill del funcionament d'una pila de combustible tipus PEM. ....	23
Fig. 5.1. Diagrama general del sistema. ....	32
Fig. 5.2. Model esquemàtic d'un sistema per a realitzar electròlisi d'aigua tipus PEM. Font: [15] .....	37
Fig. 5.3. Diagrama de blocs del sistema d' electròlisi d'aigua tipus PEM. Font: [15].....	38
Fig. 5.4. Sistema d'entrada d'aire. Font: [19].....	40
Fig. 5.5. Diagrama de blocs del sistema de la pila de combustible. Fonts: [19] [20].....	41
Fig. 5.6. Hidrogen produït durant un any, en unitats d'energia i amb resolució horària segons la simulació.....	50
Fig. 5.7. Hidrogen acumulat al dipòsit durant un any, en unitats d'energia i amb resolució horària segons la simulació. ....	50
Fig. 5.8. Energia produïda per la pila de combustible durant un any, en unitats d'energia i amb resolució horària segons la simulació. ....	51
Fig. 5.9. Resultats de la simulació de gener. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris. ....	53
Fig. 5.10. Resultats de la simulació de gener. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau.. ....	53
Fig. 5.11. Resultats de la simulació de gener. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia. ....	53
Fig. 5.12. Resultats de la simulació de febrer. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris. ....	54

Fig. 5.13. Resultats de la simulació de febrer. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau. ....	54
Fig. 5.14. Resultats de la simulació de febrer. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia. ....	54
Fig. 5.15. Resultats de la simulació de març. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris. ....	55
Fig. 5.16. Resultats de la simulació de març. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau. ....	55
Fig. 5.17. Resultats de la simulació de març. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia. ....	55
Fig. 5.18. Resultats de la simulació d'abril. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris. ....	56
Fig. 5.19. Resultats de la simulació d'abril. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau. ....	56
Fig. 5.20. Resultats de la simulació d'abril. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia. ....	56
Fig. 5.21. Resultats de la simulació de maig. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris. ....	57
Fig. 5.22. Resultats de la simulació de maig. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau. ....	57
Fig. 5.23. Resultats de la simulació de maig. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia. ....	57
Fig. 5.24. Resultats de la simulació de juny. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris. ....	58
Fig. 5.25. Resultats de la simulació de juny. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau. ....	58
Fig. 5.26. Resultats de la simulació de juny. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia. ....	58

Fig. 5.27. Resultats de la simulació de juliol. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris. ....	59
Fig. 5.28. Resultats de la simulació de juliol. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau. ....	59
Fig. 5.29. Resultats de la simulació de juliol. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia. ....	59
Fig. 5.30. Resultats de la simulació d'agost. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris. ....	60
Fig. 5.31. Resultats de la simulació d'agost. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau. ....	60
Fig. 5.32. Resultats de la simulació d'agost. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia. ....	60
Fig. 5.33. Resultats de la simulació de setembre. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris.....	61
Fig. 5.34. Resultats de la simulació de setembre. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau. ....	61
Fig. 5.35. Resultats de la simulació de setembre. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia. ....	61
Fig. 5.36. Resultats de la simulació d'octubre. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris. ....	62
Fig. 5.37. Resultats de la simulació d'octubre. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau. ....	62
Fig. 5.38. Resultats de la simulació d'octubre. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia. ....	62
Fig. 5.39. Resultats de la simulació de novembre. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris.....	63
Fig. 5.40. Resultats de la simulació de novembre. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau. ....	63

## VIII

Fig. 5.41. Resultats de la simulació de novembre. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia.....	63
Fig. 5.42. Resultats de la simulació de desembre. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris. ....	64
Fig. 5.43. Resultats de la simulació de desembre. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau. ....	64
Fig. 5.44. Resultats de la simulació de desembre. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia.....	64
Fig. 6.1. Diagrama de Gantt de la Planificació. ....	70
Fig. 6.2. Diagrama de Gantt de l'execució.....	72

## Índex de Taules

Taula 4.1. Propietats de la molècula de dihidrogen. Font: [2].	8
Taula 4.2. Valors de densitat energètica per a diferents combustibles [3].	9
Taula 4.3. Comparativa general de les principals tecnologies de piles de combustible.....	24
Taula 4.4. Avantatges i inconvenients de la PEMFC [13].	25
Taula 4.5. Avantatges i inconvenients de la PAFC [13].	26
Taula 4.6. Avantatges i inconvenients de la SOFC [13].	27
Taula 4.7. Avantatges i inconvenients de la AFC [13].	28
Taula 4.8. Avantatges i inconvenients de la MCFC [13].	29
Taula 5.1. Entrades i sortides de l'stack electrolític.	35
Taula 5.2. Entrades i sortides de la pila de combustible.....	39
Taula 5.3. Llistat d'elements necessaris per al sistema. EL per al sistema d'electròlisi, PC per al de pila de combustible, SAD per al sistema d'adquisició de dades i FV per a la instal·lació fotovoltaica.	46
Taula 5.4. Valors obtinguts de la simulació.	52
Taula 6.1. Recursos per a realitzar el projecte.....	68
Taula 6.2. Desglossament del treball per a realitzar el projecte.....	69
Taula 6.3. Desglossament del treball per de l'execució del projecte.	71
Taula 6.4. Hores totals.de planificació i execució.....	73
Taula 7.1. Taula amb valors d'emissions de CO <sub>2</sub> evitades a l'any.	75





## Glossari de termes

Ànode	Terminal elèctric del que brollen els electrons.
Catalitzador	Material que accelera la cinètica d'una reacció química.
Càtode	Terminal elèctric en el que entren els electrons.
Cel·la electroquímica	Aparell que produeix energia elèctrica a partir de reaccions químiques o utilitza energia elèctrica per a produir reaccions químiques.
Cel·la electrolítica	Cel·la electroquímica que duu a terme una reacció redox no espontània a partir de l'aplicació d'energia elèctrica.
Cel·la galvànica	Cel·la electroquímica que duu a terme una reacció redox espontània per a obtenir energia elèctrica.
Cogeneració	Producció d'energia tèrmica i elèctrica a partir d'un gas.
Condicions estàndard	25°C de temperatura i 1 atm de pressió.
Electròlit	Material que separa la reacció de l'ànode de la del càtode i permet el flux de ions de l'un a l'altre, evitant el transport de qualsevol altra substància.
Oxidació	Reacció en la que una espècie química perd electrons.
Oxidant	Substància que oxida altres substàncies, és a dir, que els hi fa perdre electrons.
Pila de combustible	Cel·la electroquímica que converteix l'energia potencial d'un combustible en energia elèctrica a partir d'una reacció electroquímica d'un combustible d'hidrogen amb un oxidant.
Procés electroquímic	Qualsevol procés produït o acompanyat pel pas de corrent elèctric entre dues substàncies.

## XII

Redox	Reacció química en la que s'intercanvien electrons entre espècies.
Reducció	Reacció en la que una espècie química guanya electrons.
Stack	Conjunt de cel·les electroquímiques que formen un electrolitzador o una pila de combustible
Valor calorífic superior	Quantitat d'energia alliberada en forma de calor per la combustió d'un combustible quan l'aigua resultant està en estat líquid.
Valor calorífic inferior	Quantitat d'energia alliberada en forma de calor per la combustió d'un combustible quan l'aigua resultant està en estat gasós.

## Glossari d'acrònims

ACS	Aigua calenta sanitàària.
AFC	<i>Alkaline Fuel Cell</i> , pila de combustible alcalina.
CA	Corrent altern.
CC	Corrent continu.
$C_{(i)}$	Consum domèstic durant la hora (i) en kWh a la simulació.
$c_p$	Capacitat calorífica d'una substància a pressió constant.
$e^-$	Electró.
$EPC_{(i)}$	Energia elèctrica produïda a la pila de combustible durant la hora (i) en kWh a la simulació.
$EPC_{P(i)}$	Energia elèctrica produïble per la pila de combustible durant la hora (i) en kWh a la simulació.
$\Delta H_R$	Variació d'entalpia de reacció.
$\Delta h_R$	Variació d'entalpia de reacció molar.
$\Delta h_R^0$	Variació d'entalpia de reacció molar en condicions estàndard.
$\Delta h_f$	Variació d'entalpia de formació d'una substància.
$\Delta h_f^0$	Variació d'entalpia de formació d'una substància.
$\Delta S_R$	Variació d'entropia de reacció molar.
$\Delta g_R$	Variació d'energia lliure de Gibbs de reacció molar.
$EX_{(i)}$	Excedents fotovoltaics produïts durant la hora (i) en kWh a la simulació.

#### XIV

G	Energia lliure de Gibbs.
H	Entalpia.
HHV	<i>Higher heating value</i> , valor calorífic superior.
$Im_{(i)}$	Importació energètica de la xarxa elèctrica durant la hora (i) en kWh a la simulació.
LHV	<i>Lower heating value</i> , valor calorífic inferior.
$LHV_{AC(i)}$	Contingut energètic de l' $H_2$ present al dipòsit a la hora (i) en kWh a la simulació.
$LHV_{(i)}$	Contingut energètic de l' $H_2$ produït per electròlisi durant la hora (i) en kWh a la simulació.
$P_{(i)}$	Producció de la instal·lació fotovoltaica durant la hora (i) en kWh a la simulació.
PAFC	<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i> , pila de combustible d'àcid fosfòric.
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i> , pila de combustible de membrana d'intercanvi de protons.
$QPC_{(i)}$	Energia elèctrica produïda a la pila de combustible durant la hora (i) en kWh a la simulació.
S	Entropia.
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i> , pila de combustible d'òxid sòlid.
MCFC	<i>Molten Carbonate Fuel Cell</i> , pila de combustible de carbonat fos.

## **Relació de lleis, normes i reglaments**

### **Normativa**

REIAL DECRET 1434/2002, de 27 de desembre, pel qual es regulen les activitats de transport, distribució, comercialització, subministrament i procediments d'autorització d'instal·lacions de gas natural.

LLEI 34/1998, de 7 d'octubre, del sector d'hidrocarburs.

REIAL DECRET 186/2016, de 6 de maig, pel qual es regula la compatibilitat electromagnètica dels equips elèctrics i electrònics.

REIAL DECRET 842/2002, de 2 d'agost, pel qual s'aprova el Reglament electrotècnic per a baixa tensió.

REIAL DECRET 413/2014, de 6 de juny, pel qual es regula l'activitat de producció d'energia elèctrica a partir de fonts d'energia renovables, cogeneració i residus.

REIAL DECRET 900/2015, de 9 d'octubre, pel qual es regulen les condicions administratives, tècniques i econòmiques de les modalitats de subministrament d'energia elèctrica amb autoconsum i de producció amb autoconsum.

REIAL DECRET 244/2019, de 5 d'abril, pel qual es regulen les condicions administratives, tècniques i econòmiques de l'autoconsum d'energia elèctrica.

REIAL DECRET 1699/2011, de 18 de novembre, pel qual es regula la connexió a xarxa d'instal·lacions de producció d'energia elèctrica de petita potència.

REIAL DECRET 661/2007, de 25 de maig, per el qual es regula l'activitat de producció energètica en règim especial.

REIAL DECRET 1110/2007, de 24 d'agost, per el qual s'aprova el Reglament unificat de punts de mesura del sistema elèctric.

REIAL DECRET 1955/2000, d'1 de desembre, per el qual es regulen les activitats de transport, distribució, comercialització, subministrament i procediments d'autorització d'instal·lacions elèctriques.

REIAL DECRET 656/2017, de 23 de juny, pel qual s'aprova el Reglament d'emmagatzematge de productes químics i les seves instruccions tècniques complementàries MIE APQ 0 a 10.

REIAL DECRET 2060/2008, de 12 de desembre, pel qual s'aprova el Reglament d'equips a pressió i les seves instruccions tècniques complementàries.

LLEI 20/2009, del 4 de desembre, de prevenció i control ambiental de les activitats

LLEI 5/2013, d'11 de juny, per la qual es modifiquen la LLEI 16/2002, d'1 de juliol, de prevenció i control integrats de la contaminació, i la LLEI 22/2011, de 28 de juliol, de residus i sòls contaminats.

LLEI 21/2013, de 9 de desembre, d'avaluació ambiental.

REIAL DECRET 314/2006, de 17 de març, pel qual s'aprova el Codi tècnic de l'edificació.

Ordenances municipals.

*Guía descriptiva del Procedimiento de Conexión a la Red de Red Eléctrica de España.*

Resolució d'11 de febrer de 2005, de la Secretaria General de la Energia, per la que s'aprova un conjunt de procediments de caràcter tècnic i instrumental necessaris per a realitzar la adequada gestió tècnica del Sistema Elèctric.

**Estàndards**

El comitè encarregat de generar estàndards en matèria d'hidrogen a l'estat espanyol és l'UNE: CTN 181. El llistat d'estàndards a seguir en aquesta tecnologia son els següents:

ISO/TC 197 Tecnologies de l'hidrogen.

CEN/CLC/JTC 6 Hidrogen en sistemes d'energia.

UNE-EN 17127 Combustible H<sub>2</sub>.

UNE-ISO 14687:2006 Hidrogen com a combustible, especificacions de producte.

UNE-ISO/TR 15916:2007 IN Consideracions bàsiques de seguretat en sistemes d'hidrogen.

UNE 181001:2010 Tecnologies d'Hidrogen, Terminologia.

UNE-ISO 22734-1:2012 Generadors d'hidrogen mitjançant electròlisi d'aigua.

UNE-ISO/TS 20100:2013 Hidrogen gasós, estacions de servei.





# **1. Objectius**

## **1.1. Propòsit**

Dissenyar i simular de forma preliminar un sistema d'acumulació d'energia solar fotovoltaica per a un habitatge basat en hidrogen, a partir d'electròlisi, emmagatzematge i piles de combustible.

## **1.2. Finalitat**

Disposar del disseny preliminar d'un sistema que implicarà diverses àrees de coneixement de l'ESUPT per al seu desenvolupament. Aquest sistema ha de ser capaç d'emmagatzemar excedents d'energia renovable no utilitzats degut a la diferència entre la corba de consum de l'habitatge i la corba de producció de la instal·lació.

## **1.3. Objecte**

Disseny preliminar d'un sistema que converteix els excedents d'una instal·lació fotovoltaica en hidrogen mitjançant electròlisi i els emmagatzema en un dipòsit per a, posteriorment, ser convertits en energia elèctrica mitjançant un sistema de pila de combustible.

## **1.4. Abast**

S'inclouen el disseny a nivell de diagrama de blocs del sistema, la identificació dels components corresponents i els càlculs i dimensionament de producció d'hidrogen, de producció energètica i de capacitat d'acumulació.

No s'inclouen el disseny al detall de cadascun dels subsistemes ni plànols de la instal·lació.

## **1.5. Context en les línies de recerca del Tecnocampus**

Amb aquest projecte es pretén participar en la obertura d'una nova línia de recerca a l'Escola Superior Politècnica centrada en l'aplicació de l'energia d'hidrogen, aquesta línia de recerca es durà a terme en l'àmbit de Sostenibilitat del grup de recerca FI4.

En el projecte es contempla fer el disseny del sistema en línies generals, fet que després permetrà desenvolupar projectes de detall dels diferents components que el formen, que a més tenen relació amb els àmbits tecnològics estudiats a l'escola, com poden ser:

- Sistema de conversió CC/CA tant de la cel·la electrolítica com de la pila de combustible en l'àmbit de l'electrònica de potència.
- Sistema de gestió tèrmica tant de la cel·la electrolítica com de la pila de combustible en l'àmbit de màquines tèrmiques.
- Sistema de transport i d'emmagatzematge de l'H<sub>2</sub> en l'àmbit de l'enginyeria de fluids.
- Sistemes de control i monitorització, tant global com de cada subsistema, en els àmbits de control industrial i la instrumentació electrònica.
- Aplicacions i topologies alternatives del sistema en l'àmbit de la sostenibilitat.
- Estudis de viabilitat econòmica i tècnica posteriors ja que es tracta d'una tecnologia en creixement.

## **2. Introducció**

### **2.1. Objecte**

L'objectiu d'aquest projecte és el disseny, simulació i dimensionament d'un sistema d'emmagatzematge d'energia solar fotovoltaica basat en redirigir els excedents energètics a un electrolitzador que els convertirà en hidrogen, que s'emmagatzemarà en un tanc, i que es podrà utilitzar per donar energia a la instal·lació gràcies a una pila de combustible.

L'ús d'aquest sistema prové de la necessitat de cobrir el consum de l'habitatge quan el camp fotovoltaic no estigui produint prou energia, ja que usualment les hores de més producció d'aquest tipus d'energia no corresponen a les hores de més consum de l'habitatge. Cal afegir que també es podria utilitzar el sistema per alimentar un habitatge aïllat de la xarxa elèctrica o per a carregar el dipòsit d'un vehicle d'hidrogen.

El que fa interessant l'hidrogen com a portador d'energia, i en aquest cas com a sistema d'emmagatzematge d'energia, és el fet que la reacció amb la que es recupera la energia emmagatzemada no produeix cap contaminant, a més, aquest hidrogen pot ser produït amb energia elèctrica provinent de fonts renovables. En un habitatge hi ha un factor més que pot convertir-lo en un sistema d'emmagatzematge interessant, la possibilitat d'utilitzar la pila d'hidrogen en cogeneració elèctrica i tèrmica, augmentant molt la eficiència total del sistema.

### **2.2. Revisió d'antecedents**

En aquest projecte ha sigut necessari fer un estudi de diferents llibres, articles i documents sobre l'estat de l'art de l'electròlisi, de les piles de combustible i de la cogeneració amb hidrogen tant a nivell tècnic com legal.

## 2.3. Necessitats d'informació

Per a poder realitzar el projecte s'ha estudiat la literatura de les matèries d'electròlisi d'aigua, d'emmagatzematge, de seguretat, de piles de combustible i de topologia dels sistemes que impliquen les tecnologies anteriors.

## 2.4. Abast

Aquest projecte inclou:

- Disseny bàsic del sistema d'acumulació d'energia solar fotovoltaica en forma d'H<sub>2</sub> per a l'ús en un habitatge.
- Identificació tots els subsistemes implicats amb realització d'un llistat de components i d'un disseny a nivell diagrama de blocs.
- Estudi de l'estat legal i normatiu de les tecnologies a utilitzar.
- Llistat dels components i de la topologia del sistema.
- Dimensionament de la instal·lació per a simular la producció energètica anual d'aquest. La simulació està basada en l'estat de l'art de les eficiències dels diferents subsistemes que la formen, i no en la modelització del comportament físic dels components.
- Estudi econòmic en base a la simulació i a l'estat de l'art de les tecnologies utilitzades.

Aquest projecte no inclou:

- El disseny constructiu de la instal·lació.
- El disseny de detall de la instal·lació.
- El disseny, el càlcul i el dimensionament dels sistemes auxiliars com poden ser el d'energia tèrmica, el cablejat elèctric o el sistema de control i adquisició de dades.
- El dimensionament i la selecció dels components comercials del sistema.
- Els plànols de la instal·lació.
- La gestió de riscos del sistema.

### 3. Objectius de detall i especificacions tècniques

A continuació es mostren els objectius del projecte amb les seves especificacions tècniques:

- Realitzar un disseny preliminar d'un sistema d'acumulació d'excedents d'energia renovable en forma d'hidrogen per a un habitatge unifamiliar.
  - L'energia renovable es produeix en una instal·lació fotovoltaica.
  - Els excedents es converteixen a H<sub>2</sub> a partir d'electròlisi d'aigua tipus PEM.
  - L'H<sub>2</sub> produït s'emmagatzema en forma gasosa comprimida a 200 bar en un cilindre d'acer.
  - El sistema torna a introduir l'energia a l'habitatge a partir d'una pila de combustible tipus PEM.
  
- Maximitzar l'eficiència del sistema i minimitzar el seu consum.
  - Es realitza un reaprofitament del calor generat durant l'electròlisi i la reacció de la pila de combustible per a l'habitatge.
  - Es realitza un reaprofitament de l'aigua generada a la pila de combustible, minimitzant-ne el consum.
  
- Realitzar una simulació del funcionament del sistema durant l'any.
  - Les entrades són les dades del sistema i els excedents d'energia fotovoltaica anuals amb resolució horària.
  - Les sortides són els nivells de producció i acumulació d'hidrogen i la producció d'energia del sistema en resposta al consum de l'habitatge amb resolució horària durant tot un any.



## 4. Marc conceptual

Aquest projecte es centra en buscar la millor manera d'emmagatzemar energia renovable, provinent d'una instal·lació solar fotovoltaica, en forma d'hidrogen per a un habitatge. Per a convertir l'energia elèctrica en  $H_2$  serà necessària una cel·la electrolítica, seguidament caldrà un sistema d'emmagatzematge, i finalment una pila d'hidrogen per a tornar a convertir l' $H_2$  en electricitat per a cobrir la demanda energètica de l'habitatge.

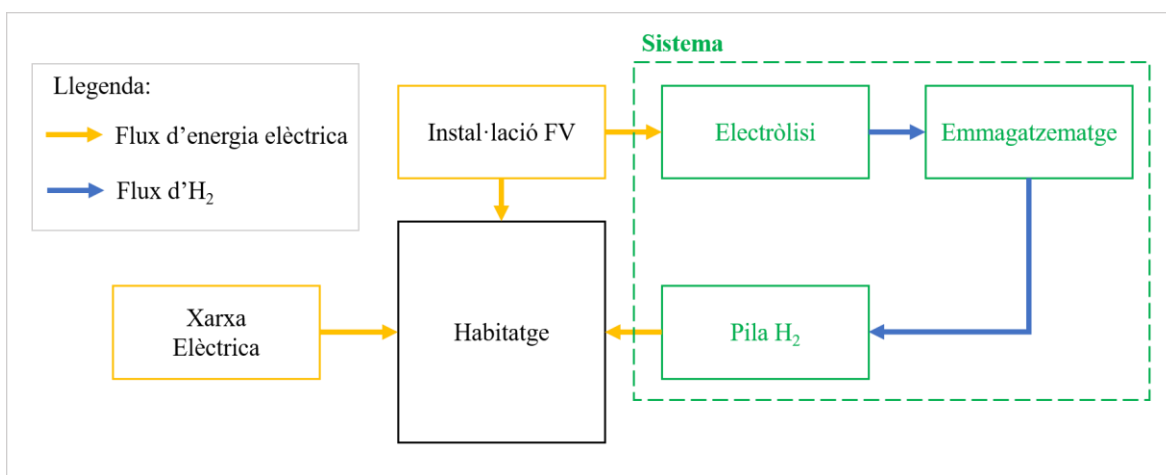


Fig. 4.1. Esquema simple del sistema.

Una propietat de les piles de combustible d'hidrogen que les fa particularment interessants per a l'ús en habitatges és l'alta eficiència energètica a la que poden arribar en sistemes de cogeneració d'electricitat més calor.

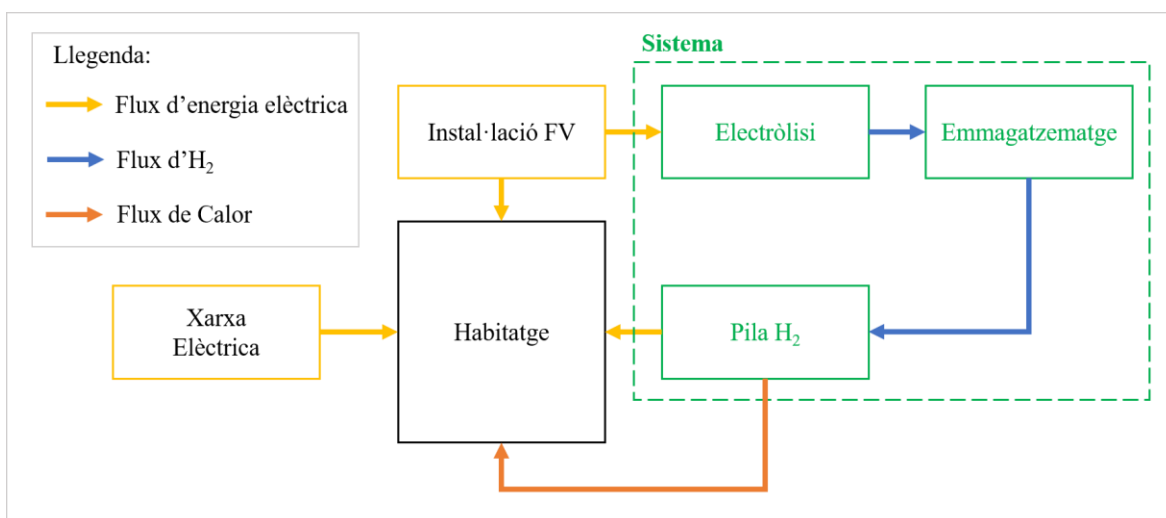


Fig. 4.2. Esquema simple del sistema amb cogeneració.

Per a poder realitzar un disseny viable caldrà generar un marc teòric en les següents matèries:

- L'hidrogen com a vector energètic.
- El procés d'electròlisi.
- L'emmagatzematge d'hidrogen.
- La pila de combustible d'hidrogen.

## 4.1. Hidrogen

L'hidrogen és l'element més simple de la taula periòdica, està format per un protó, un electró i un o més neutrons. Depenent de la quantitat de neutrons pren la forma d'un dels tres isòtops: el proti ( $^1\text{H}$ ), amb un neutró, el més comú; el deuteri ( $^2\text{H}$ ), amb dos; i el triti ( $^3\text{H}$ ), amb tres.

Es tracta de l'àtom més abundant a l'univers, formant aproximadament un 75% de la matèria bariònica, i, tot i només resultar un 0,14% de la massa de l'escorça terrestre (a causa de la seva baixa densitat), és un element amb molta presència al planeta, trobant-se en l'aigua i en els compostos orgànics acompanyant al carboni [1].

En forma lliure troba en forma de gas diatòmic ( $\text{H}_2$ ), una molècula que es pot utilitzar com a portador energètic, tot seguit es mostren algunes de les seves propietats:

Propietat	Valor
Densitat	0,08999 g/l
Temperatura de fusió	-259,2°C
Temperatura d'evaporació	-252,8°C
Valor calorífic superior	120 MJ/kg
Valor calorífic inferior	141,86 MJ/kg
Límits de deflagració	4-75% en volum a l'aire

Taula 4.1. Propietats de la molècula de dihidrogen. Font: [2].



### 4.1.1. La molècula d'H<sub>2</sub> com a portador energètic

En la següent taula es pot veure una comparació entre les densitats gravimètriques i volumètriques de diferents combustibles, com es pot veure l'hidrogen té una densitat energètica gravimètrica molt superior, però a nivell volumètric és molt inferior a causa de la seva baixa densitat.

Combustible	Densitat Energètica Gravimètrica	Densitat Energètica Volumètrica
H <sub>2</sub> (200 bar)	120 MJ/kg	2,1 MJ/l
H <sub>2</sub> (líquid)	120 MJ/kg	8,4 MJ/l
Metanol	19,7 MJ/kg	15,7 MJ/l
Petroli	42,0 MJ/kg	31,5 MJ/l
Diesel	45,3 MJ/kg	35,5 MJ/l
Querosè	43,5 MJ/kg	31,0 MJ/l

Taula 4.2. Valors de densitat energètica per a diferents combustibles [3].

### 4.1.2. Economia d'hidrogen

El concepte d'economia d'hidrogen es refereix a un sistema energètic basat en una combinació de la xarxa elèctrica i l'hidrogen com a combustible per a l'acumulació i el transport. Algunes motivacions per a la transició energètica cap a l'hidrogen [4]:

- Pot produir-se tant amb energies renovables com amb hidrocarburs, ajudant a una transició energètica més progressiva.
- És un portador d'energia molt eficient i no contaminant.
- És fàcil d'emmagatzemar en grans quantitats en front de l'electricitat.
- Pot servir per a estabilitzar una xarxa elèctrica amb molta producció renovable variable.
- Permet generació sota demanda i generació distribuïda.
- Pot permetre una alliberació econòmica dels hidrocarburs per als països no productors.

Alguns reptes a afrontar per a aconseguir aquesta transició energètica i econòmica són [4]:

- Cal abaratir la producció de les piles de combustible i de les cel·les electrolítiques amb materials alternatius i economia d'escala.
- Cal construir una infraestructura de transport, emmagatzematge i servei del combustible.
- Cal augmentar la producció d'hidrogen.
- Cal desenvolupar i millorar les tecnologies d'emmagatzematge.
- Cal desenvolupar processos nets d'extracció d'hidrogen a partir d'hidrocarburs (secrest de carboni).
- Cal reduir la sensibilitat dels catalitzadors de platí de les cel·les.

### **4.1.3. Seguretat**

Algunes propietats a tenir en compte per a la seguretat d'un sistema de producció, emmagatzematge i ús de l'hidrogen son [2] [5]:

- És un gas extremadament inflamable, entre 4% i 75% en volum en l'aire, i s'ha de buscar no arribar mai al límit inferior per al disseny del sistema de seguretat. Per a que es realitzi la deflagració és necessària la presència d'un gas oxidant com l'oxigen i una font d'energia o una temperatura alta.
- Per a que es realitzi una explosió els límits de concentració estan més restringits, entre 11% i 59% en volum en l'aire, i només es pot donar en condicions concretes de temperatura i pressió. En àrees obertes es molt poc probable que es doni una explosió, i s'han d'evitar altes concentracions en àrees tancades.
- Si no es permet l'entrada de l'agent oxidant dins del cilindre on s'emmagatzema, tot i existir una font d'ignició aquesta no es dona. Un cilindre d'hidrogen comprimit no permet l'entrada d'aire exterior, i per tant es una forma segura d'emmagatzemar-lo.
- La flama és invisible sota la llum diürna, ja que emet una longitud d'ona propera a la ultraviolada. Existeixen sensors capaços de detectar-la.
- La flama s'apaga amb aigua polvoritzada, pols, CO<sub>2</sub> o haló.
- La flama ascendeix de forma natural en l'aire (degut a la baixa densitat), fet que la fa menys perillosa que una flama d'hidrocarbur.
- Explosió mesclat amb altres gasos, evitar guspies.

Hi ha un fenomen anomenat fragilització per hidrogen que es dona en alguns metalls exposats a àtoms d'hidrogen creats per dissociació de molècules d' $H_2$ . Els metalls en els que té lloc la reacció són els que tenen una estructura cristal·lina cúbica centrada al cos com l'acer ferrític, el crom i el molibdè; l'estructura cúbica centrada en les cares com les de l'acer austenític, l'alumini, el níquel o el coure són menys propenses a la reacció. Aquest fenomen es pot evitar fent una tria correcta dels materials, i apareix principalment en zones d'alta tensió com esquerdes degudes a cicles d'esforç mecànic, produint-ne una propagació [6].

L'emmagatzematge d' $H_2$  comprimit es porta realitzant des de fa dècades i es realitza en contenidors d'acer o de compost de fibra a pressions entre 5 i 95 MPa, està molt comprovat que aquest mètode d'emmagatzematge són segurs i que les pèrdues per permeabilitat de l' $H_2$  són insignificants i no representen un problema de seguretat [6].

De cara al disseny d'un sistema basat en hidrogen cal assegurar-se de [6]:

- Que totes les canonades i vàlvules estan completament segellades (cal que estiguin soldades).
- Que se sobredimensioni la pressió màxima que poden suportar els cilindres d'emmagatzematge.
- Que totes les mesures de seguretat siguin redundants.
- Que en cas d'augment de la pressió, foc o altres problemes hi hagi vàlvules de d'alliberació de la pressió.
- Reduir al mínim la quantitat de cilindres i la longitud total de canonades per a minimitzar la quantitat d'elements que es puguin malmetre.

Per a prevenir accidents cal evitar la formació de núvols de gas i les sobrepressions amb les següents mesures [6]:

- Permetre una lliure circulació vertical del gas, fent ús de la seva baixa densitat per a dissoldre'l ràpidament.
- Assegurar que la coberta té respiradors que permetin l'escapament del gas i col·locar el cilindre a prop de les parets per a que enviïn el gas en direcció vertical.
- Utilitzar materials certificats per la Directiva Europea d'Equips de Pressió i seguir la Directiva Europea de Combustibles Alternatius.

## 4.2. Termodinàmica en reaccions electroquímiques

L'estudi de les reaccions electroquímiques prové del fet que tant la cel·la electrolítica com la pila de combustible son cel·les galvàniques, basades en reaccions electroquímiques.

En aquest apartat s'estudia la energia ideal que pot extreure d'una reacció sense tenir en compte les pèrdues. S'introduiran les magnituds necessàries per al càlcul del voltatge i la eficiència ideals de la reacció.

### 4.2.1. Entalpia (H)

L'entalpia o contingut calorífic: és l'energia necessària per a crear un sistema més l'energia necessària per a generar l'espai que ocupa, establint la seva pressió i el seu volum. Quan la variació d'entalpia  $\Delta H$  d'una reacció és negativa la reacció és exotèrmica, en canvi, quan  $\Delta H$  és positiva és endotèrmica.

A partir de la definició d'entalpia es poden definir magnituds relacionades amb les reaccions:

- L'entalpia de reacció molar  $\Delta h_R$  permet saber la màxima energia que es pot obtenir en forma de calor per mol de substància reaccionant.
- L'entalpia de reacció molar estàndard  $\Delta h_R^0$  és la  $\Delta h_R$  de la reacció en condicions estàndard (a 1 atm de pressió i normalment 25°C). Es pot calcular restant les entalpies de formació estàndard  $\Delta h_f^0$  ponderades dels reactius a la dels productes.
- L'entalpia de formació estàndard  $\Delta h_f^0$  d'una substància és la quantitat d'entalpia requerida per a formar un mol d'una substància en condicions estàndard, aquestes quantitats estan tabulades.
- El valor calorífic superior (*higher heating value*, HHV) d'un combustible és la calor total alliberada en la combustió d'aquest quan l'aigua resultant està en estat líquid.
- El valor calorífic inferior d'un combustible (*lower heating value*, LHV) d'un combustible és la calor total alliberada en la combustió d'aquest menys la calor de vaporització de l'aigua gasosa resultant.

$$LHV = HHV - Q_{\text{vaporització } H_2O} \quad (4.1)$$

Per a calcular l'entalpia de formació a temperatures diferents als 25°C dels valors tabulars s'utilitza la llei de Kirchhoff, que relaciona la variació d'entalpia amb la temperatura:

$$\Delta h_f = \Delta h_f^0 + \int_{T_0}^T c_p(T) \cdot dT \quad (4.2)$$

Sent  $\Delta h_f$  l'entalpia de formació a la temperatura desitjada,  $c_p(T)$  la capacitat calorífica de la substància a pressió constant i  $T$  la temperatura a la que es vol calcular l'entalpia. Cal tenir en compte els canvis de fase en el rang de temperatures estudiat. Aquesta fórmula permet calcular les  $\Delta h_f$  dels reactius i els productes d'una reacció a una temperatura diferent a l'estàndard per a poder calcular la  $\Delta h_R$  total de la reacció en aquestes condicions.

La variació d'entalpia de combustió permet saber la màxima energia que es pot extreure d'un combustible convertint l'energia química del canvi en els enllaços en energia calorífica [7] [8] [9].

#### 4.2.2. Entropia (S)

L'entropia és una magnitud extensiva d'un sistema termodinàmic directament relacionada amb la quantitat de configuracions microscòpiques que aquest pot tenir, dona una idea del desordre del sistema. Aquesta magnitud determina la reversibilitat d'un procés, quan augmenta entre l'estat final i l'inicial el procés és irreversible; i si es manté igual és reversible.

A partir de la definició entropia es poden definir magnituds relacionades amb les reaccions:

- L'entropia de reacció molar  $\Delta s_R$  permet saber la variació d'entropia per mol de substància reaccionant.
- L'entropia de reacció molar estàndard  $\Delta s_R^0$  és la  $\Delta s_R$  de la reacció en condicions estàndard (a 1 atm de pressió i normalment 25°C). Es pot calcular restant les entropies estàndard  $s^0$  ponderades dels reactius a la dels productes.

Per a calcular l'entropia a temperatures diferents als 25°C dels valors tabulars s'utilitza la següent equació, que relaciona la l'entropia amb la temperatura:

$$s = s^0 + \int_{T_0}^T \frac{c_p(T)}{T} \cdot dT \quad (4.3)$$

Sent T la temperatura a la que es vol calcular l'entropia. Cal tenir en compte els canvis de fase en el rang de temperatures estudiat. Aquesta fórmula permet calcular les s dels reactius i els productes d'una reacció a una temperatura diferent a l'estàndard per a poder calcular la  $\Delta s_R$  total de la reacció en aquestes condicions [9].

### 4.2.3. Energia Lliure de Gibbs (G)

L'energia lliure de Gibbs és l'energia necessària per a crear un sistema més l'energia necessària per a generar l'espai que ocupa menys l'energia rebuda de l'ambient en forma de transferència espontània de calor, en resum, és l'energia neta que s'hauria d'aportar externament per a crear el sistema. Quan la variació de l'energia de Gibbs  $\Delta G$  d'una reacció és negativa la reacció és espontània (en la direcció calculada), quan  $\Delta G$  és positiva la reacció no és espontània, i si és zero està en equilibri.

L'energia lliure de Gibbs d'un sistema és la màxima energia que es podria extreure d'aquest, i és equivalent a la màxima energia que es pot extreure d'una reacció en forma de treball elèctric. Llavors es necessari calcular la energia de Gibbs molar  $\Delta g_R$  de la reacció per a saber treball elèctric màxim que es pot extreure per mol de combustible. En condicions de temperatura i pressió constants:

$$\Delta g_R = \Delta h_R - T \cdot \Delta s_R \quad (4.4)$$

Sent  $\Delta s_R$  l'entropia molar de la reacció i T la temperatura a la qual es realitza la reacció [9] [10].

### 4.2.4. Voltatge d'una cel·la electroquímica

Tal com s'ha vist a l'apartat anterior la energia de Gibbs molar  $\Delta g_R$  de la reacció per a saber treball elèctric màxim que es pot extreure per mol de combustible:

$$-\Delta g_R = W_{el\grave{e}ctric} = Q \cdot E \quad (4.5)$$

Sent  $W_{el\grave{e}ctric}$  el treball el\`etric,  $Q$  la c\`arrega transportada i  $E$  la diferencia de potencial a trav\`es de la que es transporta la c\`arrega.

Assumint que la c\`arrega \`es transportada per electrons:

$$Q = n \cdot F = n \cdot N_A \cdot q_e \quad (4.6)$$

Sent  $n$  la quantitat de mols d'electrons transportats i  $F$  la constant de Faraday (96.485,3321233 C/mol), que permet convertir els mols d'electrons en c\`arrega a partir de la c\`arrega de l'electr\`o  $q_e$  ( $1,6021765 \times 10^{-19}$  C/electr\`o) i la quantitat d'electrons que cont\`e un mol d'electrons, \`es a dir, el nombre d'Avogadro  $N_A$  ( $6,02214076 \times 10^{23}$  part\`icules/mol).

Finalment es poden extreure les seg\`uents relacions:

$$\Delta g_R = -n \cdot F \cdot E \quad (4.7)$$

$$E^0 = -\frac{\Delta g_R^0}{n \cdot F} \quad (4.8)$$

Sent  $E^0$  el voltatge ideal de la cel\`la i  $\Delta g_R^0$  la energia lliure de Gibbs molar de la reacci\`o en les condicions de temperatura i pressi\`o est\`andard (i constants) [8].

Aquest voltatge pot canviar a causa de tres variables:

- Temperatura: produeix petites variacions en el voltatge d'una cel\`la, d'aproximadament  $-23\text{mV}$  augmentant  $100^\circ\text{C}$ .
- Pressi\`o: produeix petites variacions en el voltatge d'una cel\`la, d'aproximadament  $+15\text{mV}$  en augmentar 2 atm.
- Concentraci\`o: produeix variacions molt petites en el voltatge.

### 4.2.5. Eficiència d'una cel·la electroquímica

Primerament cal definir el terme eficiència  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\text{energia útil}}{\text{energia total}} \quad (4.9)$$

Tractant-se d'una reacció química es pot convertir en [8] [9]:

$$\varepsilon = \frac{\text{treball}}{\Delta h_R} = \frac{\Delta g_R}{\Delta h_R} \quad (4.10)$$

## 4.3. Cinètica de les reaccions electroquímiques

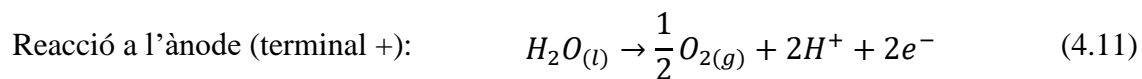
La cinètica de la reacció explica la velocitat a la que aquesta es produeix, és a dir, la quantitat de reaccions per unitat de temps, que a la vegada és proporcional a la intensitat. En les cel·les electroquímiques s'utilitza més la magnitud densitat de corrent ( $j$ ), ja que la intensitat total depèn de l'àrea de reacció, que sempre s'intenta maximitzar. Una altra magnitud molt utilitzada és la ASR (*Area Specific Resistance*) que és la multiplicació de la resistència per l'àrea.

Un altre concepte que cal introduir es el del catalitzador, un material que accelera la reacció (reduint-ne l'energia d'activació) per a fer-la prou ràpida com per que sigui útil per a produir un corrent significatiu. En els tipus de cel·les més populars, les PEM (*Proton Exchange Membrane*) aquests catalitzadors són metalls de la família del platí, fet que els hi fa tenir un cost elevat.

## 4.4. Electròlisi d'aigua

L'electròlisi és un procés electroquímic per a la producció d'hidrogen a partir d'aigua., aquest procés es produeix en una cel·la electrolítica. La reacció de separació d'aigua és la següent (electròlisi PEM):





La cel·la electrolítica és un aparell que aplica un voltatge de CC a través dos terminals a l'aigua i produeix  $H_2$  i  $O_2$  a partir de l'aigua. A la següent figura es pot veure un esquema simplificat del funcionament de l'aparell:

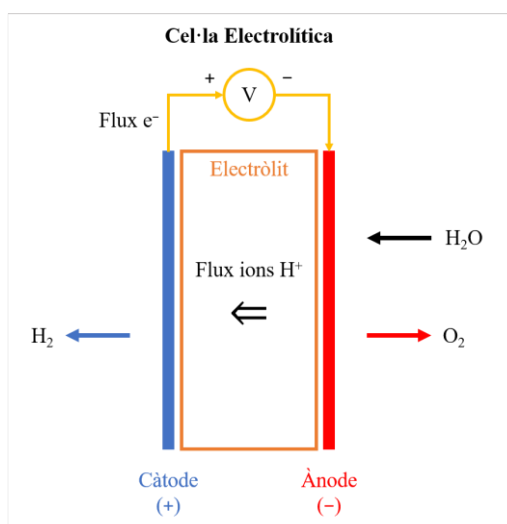


Fig. 4.3. Esquema senzill d'una cel·la electrolítica.

Elements que formen una cel·la electrolítica [3]:

- Voltatge extern: aporta l'energia necessària per a realitzar la reacció.
- Ànode: terminal positiu de l'aparell, on té lloc la separació de l'aigua en H i O.
- Càtode: terminal negatiu de l'aparell on es formen les molècules d' $H_2$ .
- Electròlit: material que separa les dues semireaccions i només deixa passar els ions  $H^+$ .
- Catalitzador: material que accelera la reacció permetent un funcionament eficient del sistema.

#### 4.4.1. Termodinàmica de l'electròlisi

A partir de l'apartat 4.2 es poden definir algunes magnituds importants en el procés d'electròlisi:

Voltatge d'energia lliure: 
$$E(T, P) = \frac{\Delta g_R(T, P)}{n \cdot F} \quad (4.14)$$

Voltatge termo-neutral: 
$$V(T, P) = \frac{\Delta h_R(T, P)}{n \cdot F} \quad (4.15)$$

Voltatge aplicat a la cel·la: 
$$U(T, P) \quad (4.16)$$

Per al correcte funcionament de la cel·la electrolítica és necessari que  $U$  sigui superior a  $V$ , ja que  $U$  sigui superior a  $E$  pot ser insuficient per al correcte funcionament, ja hi ha una caiguda en la densitat de corrent. En resum :

Funcionament correcte: 
$$U > V \quad (4.17)$$

Arrencada correcta 
$$V > U > E \quad (4.18)$$

Caiguda de corrent

Com a conclusió, cal aplicar una tensió superior a la teòrica per a evitar caigudes en el corrent que poden perjudicar la cel·la.

### 4.4.2. Sistema per a l'electròlisi

Per al correcte funcionament de la cel·la electrolítica cal disposar de diversos sistemes auxiliars, en les següents figures es mostren algunes topologies possibles:

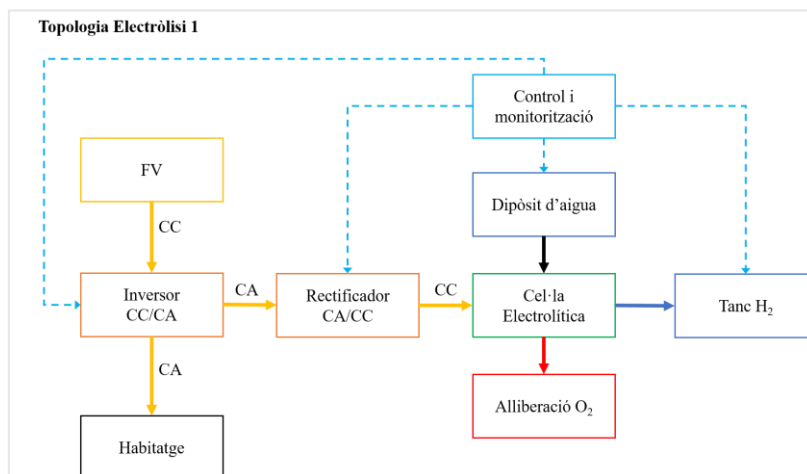


Fig. 4.4. Topologia 1 per al sistema de complet per a l'electròlisi.

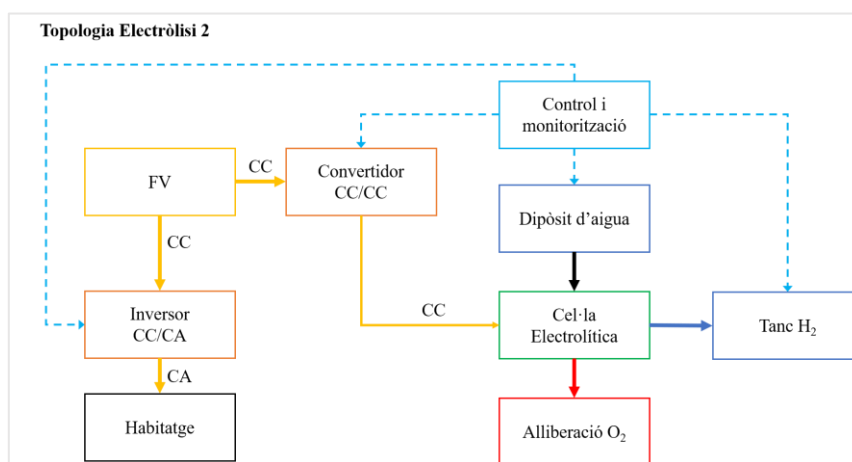


Fig. 4.5. Topologia 2 per al sistema complet de l'electròlisi.

A continuació s'expliquen els funcionaments d'ambdues opcions:

- Topologia 1: el sistema rep energia de la instal·lació FV, que és convertida a CA en un inversor, i seguidament a CC per un rectificador que alimentarà la cel·la electrolítica amb el corrent adequat per al seu correcte funcionament.
- Topologia 2: el sistema rep energia de la instal·lació FV, que es transformada directament amb un convertidor CC/CC per a alimentar la cel·la electrolítica.

Els principals elements que formen el sistema són:

- Cel·la electrolítica: conjunt (*stack*) de cel·les apilades per a generar la quantitat adequada d'H<sub>2</sub> per a convertir tota l'energia que arriba de la planta solar.
- Sistema d'alimentació: entrega a la cel·la l'aigua necessària per a realitzar la reacció, assegurant que aquesta mai en rep menys del compte, ja que això podria produir-li danys.
- Electrònica de potència: permet entregar l'energia a la cel·la en la forma adequada per al seu correcte funcionament.
- Control i monitorització: assegura un correcte funcionament de totes les parts per a optimitzar el cicle de vida de la cel·la i permet realitzar un millor manteniment de la planta. Està format per diversos sensors i un sistema digital de control i comunicacions.

## 4.5. Emmagatzematge de l'hidrogen

Hi ha diverses tecnologies que permeten emmagatzemar l'hidrogen per a després utilitzar-lo com a combustible en una pila de combustible, les següents són les principals [11]:

- Hidrogen líquid: existeix a temperatures per sota dels -253°C si es vol emmagatzemar a pressió atmosfèrica. Aquest sistema té una gran densitat energètica volumètrica (1,2 kWh/l) però sofreix pèrdues per evaporació en petits períodes d'inactivitat.
- Hidrogen gasós comprimit: el nivell màxim de pressió viable actualment és de 300 bars, a 200 bars la densitat d'energia volumètrica és de 0,58 kWh/l. És el més utilitzat.
- Hidrogen crio-comprimit: mescla líquid-gas a temperatura criogènica en un contenidor a 250-350 bars, té una densitat de 71 kg/m<sup>3</sup>.
- Hidrogen sòlid combinat amb altres elements: pot ser la millor manera a nivell de densitat energètica, i es troba actualment en fort desenvolupament. Presenta problemes en la recuperació de l'hidrogen ja que es requereixen altes temperatures.

### 4.5.1. Emmagatzematge en forma gasosa

A causa de que aquest sistema és el més viable per a utilitzar en un habitatge se n'ha fet un estudi en més profunditat que dels altres tipus.

Hi ha dos tipus de compressió:

- Adiabàtica: sense transferència de calor, són necessaris 5,45 MJ de treball per kg d'H<sub>2</sub> comprimit, és a dir, un 4,5% de l'energia que conté aquesta quantitat.
- Isotèrmica: sense canvi de temperatura durant la compressió, són necessaris 3,03 MJ de treball per kg d'H<sub>2</sub> comprimit, és a dir, un 2,5% de l'energia que conté aquesta quantitat.

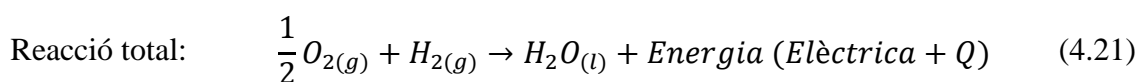
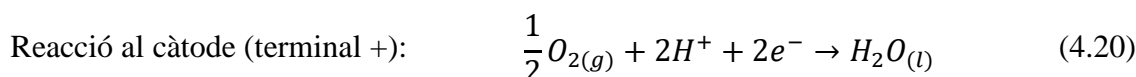
Normalment els processos de compressió són una combinació dels dos tipus anteriors, però a temperatures més baixes el procés és més isotèrmic que adiabàtic, fet que és interessant, ja que es busca el màxim rendiment possible [11].

En quant als materials del tanc cal tenir en compte els següents fenòmens:

- Fragilització del material per exposició a l'hidrogen, que pot generar esquerdes.
- Atac químic de l'hidrogen.
- Permeabilitat a l'hidrogen.
- Corrosió externa.
- Resistència mecànica als impactes.
- Resistència mecànica als canvis de pressió.

## 4.6. Pila de combustible d'hidrogen

En una pila de combustible d'hidrogen s'aprofita la diferència d'energia entre la ruptura i la formació d'enllaços per a generar un corrent elèctric continu. La reacció utilitzada per a explicar el procés és la següent:



Aquesta es tracta d'una reacció redox, els seus terminals són:

- L'ànode és el terminal del qual brollen els electrons, on té lloc la oxidació de l' $H_2$ .
- El càtode és el terminal que absorbeix electrons, on té lloc la reducció de l' $O_2$ .

Primerament cal entendre d'on prové l'energia que genera la pila, els enllaços entre els àtoms d' $H_2$  (H-H) i els d'oxigen a la molècula d' $O_2$  (O-O) requereixen una certa quantitat d'energia  $E_A$  per a trencar-se, i els dos enllaços H-O de l'aigua alliberen una certa quantitat d'energia  $E_R$  al formar-se. La reacció és exotèrmica, és a dir allibera energia, perquè l'energia alliberada  $E_R$  és superior a l'energia d'activació  $E_A$  [12]. Aquesta diferència d'energia  $\Delta E$  prové de la reconfiguració dels electrons, és a dir, dels enllaços entre els dos estats.

Normalment aquesta energia només es pot aprofitar en forma de calor  $Q$  perquè el temps i la distància en els que es produeixen les reaccions són molt petits, per a poder utilitzar el moviment dels electrons en forma d'intensitat elèctrica cal separar els dos reactius ( $H_2$  i  $O_2$ ) mitjançant un electròlit. L'electròlit només permet circular els ions  $H^+$  a través d'ell, permetent que es facin passar els electrons externament per un conductor.

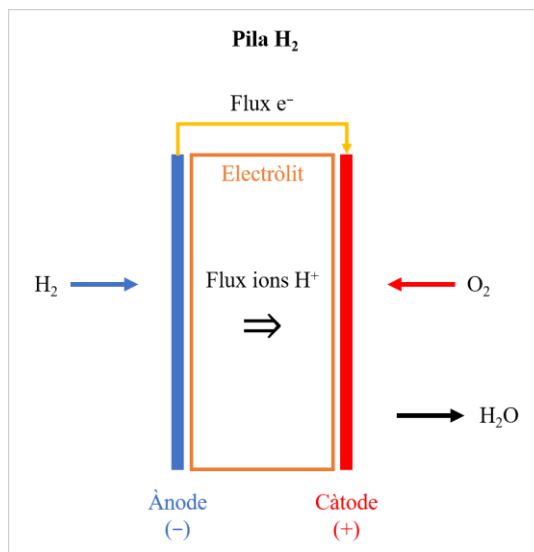


Fig. 4.6. Esquema senzill del funcionament d'una pila de combustible tipus PEM.

### 4.6.1. Termodinàmica de la pila d'hidrogen

En aquest apartat es concreten alguns càlculs teòrics a partir de la teoria de l'apartat 4.2.

Per exemple una pila de combustible d'hidrogen amb la reacció (4.21) té una  $\Delta g_R^0$  de -237,17 KJ/mol i una  $\Delta h_R^0$  de -285,83 KJ/mol, llavors a partir de l'equació (4.10):

$$\varepsilon_{\text{termodinàmica teòrica}} = \frac{\Delta g_R}{\Delta h_R} = 83\% \quad (4.22)$$

El voltatge per a aquesta mateixa reacció és:

$$\text{Voltatge a l'ànode (-):} \quad E_{\text{ànode}}^0 = -\frac{\Delta g_{\text{ànode}}^0}{n \cdot F} = \frac{0}{2 F} = -0 \text{ V} \quad (4.23)$$

$$\text{Voltatge al càtode (+):} \quad E_{\text{càtode}}^0 = -\frac{\Delta g_{\text{càtode}}^0}{n \cdot F} = \frac{237,17}{2 F} = +1,229 \text{ V} \quad (4.24)$$

$$\text{Voltatge total:} \quad E_{\text{cel·la}}^0 = E_{\text{càtode}}^0 - E_{\text{ànode}}^0 = +1,229 \text{ V} \quad (4.25)$$

Cal remarcar que aquests valors són teòrics i que en una pila de combustible real seran valors més baixos a causa de diferents pèrdues, explicades en el següent apartat.

## 4.6.2. Pèrdues en una pila

Les pèrdues en una pila de combustible es deuen principalment als següents fenòmens:

- D'activació: degudes a l'energia requerida per a iniciar la cinètica de la reacció.
- Òhmiques: en el transport de càrrega electrònica i iònica. Les ubicacions crítiques a nivell resistiu son les interfícies entre els components.
- De concentració: degudes al transport de massa dels ions de l'ànode al càtode.

## 4.6.3. Tipus de piles de combustible

Les piles de combustible es classifiquen principalment segons el material de l'electròlit, que té una gran influència en les condicions d'operació. A continuació es mostra una taula amb les principals tecnologies:

Tecnologia	Electròlit	Ió	Catalitzador	Top	Eficiència	Aplicacions
PEMFC	PEM	H <sup>+</sup>	Pt	< 90°C	50-60%	Transport Residencial
PAFC	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sup>+</sup>	Pt	180°C – 210°C	40%	Estacionari Alta potència
SOFC	YSZ	O <sup>2-</sup>	Ni	600°C – 1000°C	50-60%	Residencial Alta potència
AFC	KOH	OH <sup>-</sup>	Fe, Co, Ni Ag	60°C – 250°C	60%	Aeroespacial
MCFC	Mescla de carbonats alcalins	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Ni	~ 650°C	50%	Alta potència

Taula 4.3. Comparativa general de les principals tecnologies de piles de combustible.

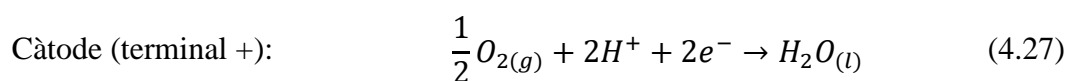
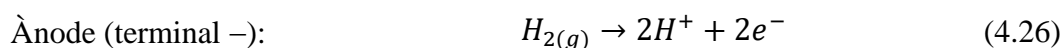


### PEMFC (*Polymer Exchange Membrane Fuel Cell*)

L'electròlit és una membrana de polímer conductora de protons (àcid sulfònic perfluorat), que permet la circulació dels protons  $H^+$  de l'ànode al càtode. La membrana és molt fina (20-200  $\mu m$ ), flexible i transparent, està recoberta per un catalitzador basat en platí amb un elèctrode de carboni com a suport, tot el conjunt MEA (Membrane Electrode Assembly) no té més d'1 mm d'ample. Aquesta membrana s'ha d'anar hidratant per a mantenir la conductivitat iònica adequada, i, per tant, no pot passar dels 90°C de temperatura d'operació. Com que la seva temperatura d'operació és baixa només s'hi poden utilitzar catalitzadors de platí [13].

L'eficiència d'aquest tipus de piles de combustible està entre 50-60%

Reacció:



Avantatges	Desavantatges
Major densitat de potència entre totes les piles de combustible (500-2500 mW/cm <sup>2</sup> ).	Materials cars (catalitzador de Pt i membrana PEM).
Millor arrencada ràpida i cicles on-off.	Requereix una gestió activa de l'aigua.
Baixa temperatura d'operació.	Catalitzador de Pt molt sensible a l'enverinament per CO i S.

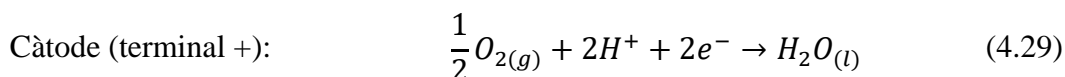
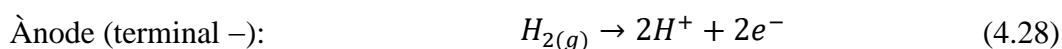
Taula 4.4. Avantatges i inconvenients de la PEMFC [13].

### PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*)

L'electròlit és àcid fosfòric ( $H_3PO_4$ ) líquid pur o en alta concentració, que permet la circulació dels protons  $H^+$  de l'ànode al càtode, contingut en una matriu de carbur de silici (SiC). S'ha de tenir en compte que l'àcid fosfòric pur es solidifica a  $42^\circ C$  i que a  $210^\circ C$  pateix una transició de fase que el fa inservible com a electròlit, per tant, la temperatura d'operació sempre està entre  $180^\circ C$  i  $210^\circ C$ . Degut a l'evaporació de l'àcid aquest s'ha d'anar emplenant constantment. La matriu de SiC aporta resistència mecànica, separa els elèctrodes i minimitza la mescla dels gasos reactius.

Els elèctrodes són de grafit porós cobert de catalitzador de Pt, que degut a la seva alta temperatura d'operació és menys susceptible a l'enverinament per CO o S. La tolerància al CO està entre 0,5% i 1,5% i la tolerància al sulfur és de 50 ppm.

La eficiència d'aquest tipus de piles de combustible està al voltant del 40%, i si s'utilitza cogeneració tèrmica es poden assolir eficiències del 70%.

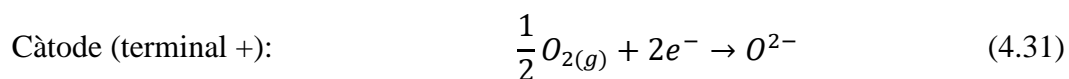
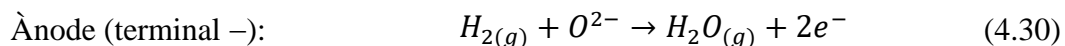


Avantatges	Desavantatges
Tecnologia madura.	Catalitzador de Pt car.
Excel·lent fiabilitat i rendiment a llarg termini.	Catalitzador de Pt molt sensible a l'enverinament per CO i S.
Electròlit relativament barat.	Electròlit corrosiu que s'ha d'anar emplenant.

Taula 4.5. Avantatges i inconvenients de la PAFC [13].

**SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)**

L'electròlit és un sòlid ceràmic anomenat YSZ (*yttria-stabilized zirconia*), un conductor de ions  $O^{2-}$ . La temperatura d'operació és de  $600^{\circ}C-1.000^{\circ}C$  fet que provoca certs desavantatges en el segellat, la interconnexió de cel·les i la tria de materials, per contra, augmenta l'eficiència i la fa ideal per a la cogeneració.

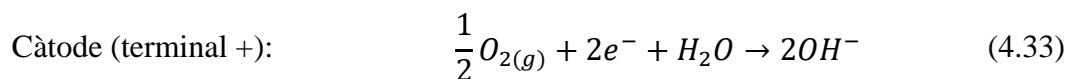
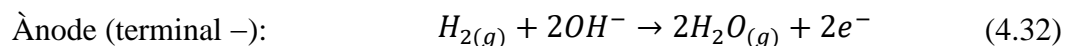


Avantatges	Desavantatges
Tecnologia madura.	Catalitzador de Pt car.
Excel·lent fiabilitat i rendiment a llarg termini.	Catalitzador de Pt molt sensible a l'enverinament per CO i S.
Electròlit relativament barat.	Electròlit corrosiu que s'ha d'anar emplenant.

Taula 4.6. Avantatges i inconvenients de la SOFC [13].

**AFC (Alkaline Fuel Cell)**

L'electròlit és hidròxid de potassi (KOH) aquós que condueix ions hidròxid  $\text{OH}^-$  de càtode a ànode. Tal com es pot veure en la següent reacció es consumeix aigua al càtode i es produeix el doble de ràpid a l'ànode, per tant, és necessari retirar l'excés d'aigua per a no diluir l'electròlit.



Beneficis del medi alcalí:

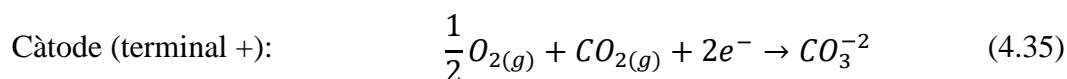
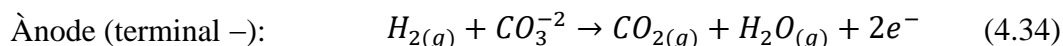
- Hi ha més varietat de metalls estables que poden actuar com a catalitzadors com el níquel.
- La reacció del càtode és molt més ràpida, per tant, la cel·la té un voltatge d'operació superior, i en conseqüència, la seva eficiència.

Avantatges	Desavantatges
Major eficiència del càtode..	Nessecita $\text{H}_2$ i $\text{O}_2$ purs pr a funcionar.
Possibilitat d'utilitzar metalls catalitzadors no preciosos.	Cal reemplenar el KOH ocasionalment. S'ha de retirar aigua de l'ànode.
Cost baix dels materials, sobretot de l'electròlit.	

Taula 4.7. Avantatges i inconvenients de la AFC [13].

**MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)**

L'electròlit és una mescla fosa de carbonats alcalins (Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), immobilitzats en una matriu de LiO-AlO<sub>2</sub>, que condueixen ions carbonat CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> de càtode a ànode. Tal com es pot veure en la següent reacció es produeix CO<sub>2</sub> al càtode que després es consumit a l'ànode, per tant, és necessari un subsistema de realimentació.



Els elèctrodes estan basats en níquel, l'ànode és d'un aliatge níquel-crom i el càtode d'òxid de níquel amb liti. La temperatura d'operació és d'aproximadament 650°C, fet que li dona flexibilitat en els combustibles a utilitzar (H<sub>2</sub>, hidrocarburs i alcohols). Els esforços mecànics en els cicles de solidificació-fusió en les arrencades i aturades fan que aquesta tecnologia sigui més adequada per a producció contínua d'energia. Aquesta tecnologia té un rendiment al voltant de 50% en la producció elèctrica, però augmenta molt en cicles combinats de calor i electricitat, arribant a un 90%.

Avantatges	Desavantatges
Flexibilitat en el combustible.	Requereix reciclat del CO <sub>2</sub> .
Catalitzadors no preciosos.	Electròlit molt calent i corrosiu
Alta eficiència en cogeneració.	Degradació molt gran, baix temps de vida.
	Materials relativament cars.

Taula 4.8. Avantatges i inconvenients de la MCFC [13].

#### 4.6.4. Sistema per al funcionament de la pila d'H<sub>2</sub>

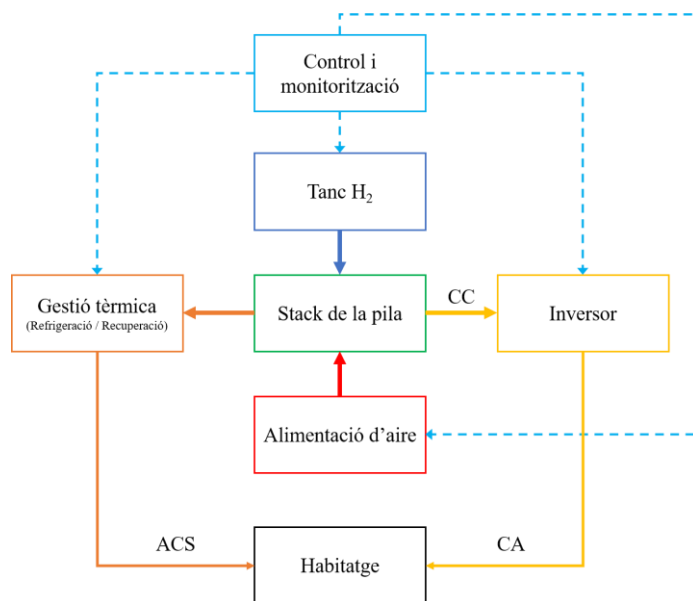


Fig. 4.7. Esquema del sistema complet per al funcionament d'una pila de combustible en un habitatge.

El conjunt de subsistemes per al correcte funcionament de la pila de combustible són els següents:

- Subsistema de la pila: un conjunt de piles de combustible (*stack*) per a assolir el nivell de tensió i intensitat necessaris per a cobrir la demanda de l'habitatge.
- Subsistema d'alimentació: alimenta la pila amb H<sub>2</sub> del tanc d'emmagatzematge i aire de l'atmosfera per assegurar que mai li falti combustible, ja que aquest fet podria perjudicar la membrana.
- Subsistema d'electrònica de potència: converteix l'energia en CC generada per la pila en CA utilitzable a l'habitatge, l'aparell utilitzat és un inversor.
- Subsistema tèrmic: gestiona el nivell de temperatura de la pila per a que aquesta funcioni a un nivell òptim i s'assegura que no se superen els límits de funcionament. Es pot utilitzar per a fer *energy harvesting* de la calor produïda en la reacció per a aprofitar-la a l'habitatge, assolint rendiments molt elevats.

## 5. Descripció detallada de la solució tècnica

Aquest apartat s'utilitzarà per a justificar les eleccions tecnològiques per a cada part del sistema d'emmagatzematge i per a descriure la solució tècnica.

### 5.1. Justificació de les eleccions tecnològiques

La tecnologia que s'utilitzarà en la cel·la electrolítica i en la pila de combustible serà la mateixa, *Proton Exchange Membrane*. Els motius de l'elecció són els següents:

- Es tracta de la tecnologia més utilitzada i desenvolupada actualment.
- Té un bon funcionament en els cicles d'arrencada-aturada, fet que la fa adequada per al funcionament per a cobrir la demanda energètica variable d'un habitatge i la producció variable d'una font renovable.
- Té la temperatura d'operació més baixa entre totes les tecnologies ( $< 90^{\circ}\text{C}$ ) i no utilitza electròlits àcids, per tant, és més adequada per a l'ús en un habitatge.
- Té la major densitat de potència entre tots els tipus, fet que permet tenir aparells més compactes.

La tecnologia que s'utilitzarà per a l'emmagatzematge de l' $\text{H}_2$  serà l'estat gasós pressuritzat, els motius de l'elecció són els següents:

- En un habitatge no és possible assolir les temperatures requerides per a emmagatzematge líquid.
- En un habitatge no es disposa de l'espai necessari per a tenir els aparells necessaris per a l'emmagatzematge en forma d'hidrur metàl·lic.

## 5.2. Introducció a la solució tècnica

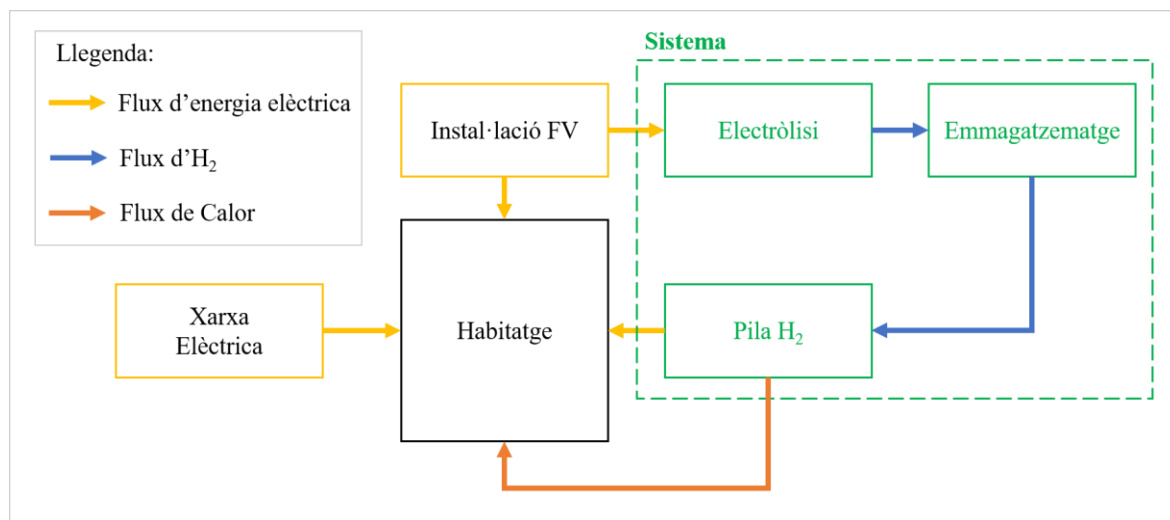


Fig. 5.1. Diagrama general del sistema.

Seguidament s'explica el funcionament del sistema en les diferents parts seguint el flux de l'energia:

- Instal·lació fotovoltaica: genera energia per a alimentar l'habitatge, però quan hi ha excedents (ja que la corba de producció i la de demanda no solen coincidir), en comptes d'injectar-se a la xarxa elèctrica s'enviaran al sistema d'emmagatzematge.
- Sistema d'electròlisi: converteix l'energia elèctrica rebuda de la instal·lació fotovoltaica en  $H_2$ , que s'emmagatzema en un tanc. Cal determinar-ne la potència de conversió per a emmagatzemar tots els excedents. La tecnologia escollida per a la cel·la electrolítica és l'electròlisi PEM.
- Sistema d'electrònica de potència: adequa l'electricitat d'entrada i de sortida dels diferents subsistemes per al correcte funcionament del sistema. Depenent de la topologia que s'esculli es requeriran diversos inversors, rectificadors i convertidors CC/CC. El conjunt d'aparells de potència estan dominats pel sistema de control.
- Sistema d'emmagatzematge i transport de fluids: s'encarrega de gestionar en tot moment els fluxos de gas  $H_2$  per a garantir l'alimentació de la pila de combustible. També



gestiona els nivells del dipòsit d'aigua per a alimentar la cel·la electrolítica i l'absorció d'aire per a alimentar la pila de combustible. Està format per el conjunt de dipòsits, tancs, canalitzacions, vàlvules i sistemes de seguretat, i està dominat i monitoritzat en tot moment pel sistema de control per a garantir l'alimentació de les cel·les i la seguretat per a les persones i els equips.

- Sistema de pila de combustible: converteix l'H<sub>2</sub> emmagatzemat en energia elèctrica aprofitable per l'habitatge. Es dimensiona per a tenir la potència necessària. La tecnologia utilitzada és PEMFC.
- Sistema de gestió tèrmica: té la tasca de gestionar els nivells de temperatura de tots els components del sistema per a optimitzar el funcionament. Es considera la opció d'afegir un sistema d'*energy harvesting* que aprofiti el calor sobrant de les reaccions per a l'habitatge. El conjunt d'aparells que permetin fer la gestió tèrmica estaran dominats pel sistema de control.
- Sistema de control i monitorització: assegura el correcte funcionament de tot el sistema per a assegurar el màxim rendiment, la seguretat i el manteniment. Estarà format per un control digital, un sistema de comunicacions, diversos sensors i un sistema d'adquisició de dades.

### 5.3. Estatus normatiu del sistema

En aquest apartat es mostra un resum de les barreres legals per a les diferents tecnologies utilitzades en el sistema que es troben recollides al document Informe de *Recomendaciones Legislativas para el Sector del Hidrógeno en España* de la organització HyLaw. Aquest document s'inclou en els annexos del projecte.

La organització HyLaw està formada per 18 països de la UE i disposa d'una pàgina web ([www.hylaw.eu](http://www.hylaw.eu)) amb base de dades pública que conté informació legal sobre sistemes d'hidrogen i recomanacions legislatives de millora als estats membres.

A continuació s'expliquen les barreres legals actuals de les diferents tecnologies [14].

### **5.3.1. Producció d'hidrogen mitjançant electròlisi d'aigua**

La falta de regulació concreta sobre l'electròlisi fa que aquesta estigui considerada com una activitat industrial química de producció de gasos inorgànics, sense diferencia-la de la producció d'hidrogen a partir del reformat d'hidrocarburs. Aquest fet perjudica les instal·lacions petites com la del present projecte perquè obliga a realitzar la producció d'hidrogen en sòl qualificat com a industrial, impedit completament la viabilitat legal de l'electròlisi en un habitatge. Altres problemes que genera aquest estatus són els requisits ambientals extremadament estrictes i la tramitació llarga, costosa i incerta que augmenta el cost i el temps de desenvolupament dels projectes.

### **5.3.2. Emmagatzematge d'hidrogen**

La falta de regulació també és un problema per als sistemes d'emmagatzematge, l'hidrogen es considera un producte químic perillós i inflamable que ha de seguir la reglamentació sobre Emmagatzematge de Productes Químics, fet que implica unes condicions de seguretat extremes. Les condicions de seguretat que més afecten a l'aplicació en habitatges són les de distàncies de seguretat elevades.

La consideració com a instal·lacions industrials d'emmagatzematge de productes químics i petroquímics fan que es requereixi una avaluació d'impacte ambiental.

Tot i que les emissions de gas  $H_2$  a l'atmosfera suposen un impacte ambiental mínim les obligacions administratives que implica la seva consideració legal suposen una càrrega desproporcionada per al desenvolupament de projectes.

### **5.3.3. Piles de combustible**

Un sistema de producció d'electricitat basat en una pila de combustible es pot registrar en el règim especial de productors però es contempla en el grup d'energies renovables, cogeneració i residus i, per tant, no pot rebre incentius econòmics.

Un fet d'interès és la presència de les piles de combustible en el Reial Decret 661/2007 com a equip de cogeneració i la seva desaparició en el Reial Decret 413/2014 que el substitueix, evitant que es beneficiïn així dels incentius del règim especial de productors. Es torna a donar

la situació en que la falta de marc legal perjudica el desenvolupament de projectes amb tecnologies d'hidrogen.

## 5.4. Descripció general del sistema

El sistema està format per tres subsistemes principals: electròlisi, emmagatzematge i pila de combustible. També hi ha subsistemes secundaris com el de control, de gestió tèrmica o la instal·lació fotovoltaica. En aquest apartat es defineix la interconnexió entre els subsistemes i els components que formen cadascun d'aquests.

### 5.4.1. Subsistema d'electròlisi

Aquest subsistema té el següent conjunt d'entrades i sortides:

	<b>Entrades</b>	<b>Sortides</b>
<b>Ànode</b> (+)	H <sub>2</sub> O purificada <sup>1</sup> Corrent continu (+)	O <sub>2</sub> gas
<b>Càtode</b> (-)	Corrent continu (-)	H <sub>2</sub> gas

Taula 5.1. Entrades i sortides de l'stack electrolític.

A continuació es defineixen les tasques a realitzar pel sistema amb els elements que les compleixen:

#### Stack electrolític

Produeix H<sub>2</sub> i O<sub>2</sub> a partir d'aigua i corrent continu, està format per diverses cel·les interconnectades, la quantitat i la connexió de les quals depenen de la potència que es vol assolir.

---

<sup>1</sup> S'explica en que consisteix la purificació en l'apartat Gestió de l'aigua i l'oxigen.

Cal optimitzar la densitat de corrent i l'àrea de la membrana per a maximitzar la producció d' $H_2$  i allargar la vida útil de la cel·la. Els elements que es degraden són la membrana i els catalitzadors, i actualment s'assoleixen temps d'operació contínua superiors a 40.000 hores, però aquest es pot reduir fins a 10.000 hores si s'opera en discontinuïtat [8].

### **Gestió d'aigua i oxigen (cicle de l'ànode)**

Cal alimentar el càtode amb  $H_2O$ , depenent de la qualitat de l'aigua de la zona és necessari afegir un purificador d'osmosi inversa per a evitar la degradació de l'stack a més d'un dipòsit per a acumular l'aigua purificada. En cas de la realització física d'un projecte d'aquest tipus seria necessària una avaluació de l'aigua disponible.

Cal realitzar un regulació de la temperatura de l'stack. Per a assegurar la refrigeració cal que l'aigua circuli de forma constant. S'utilitza una bomba de circulació i, opcionalment, un intercanviador de calor.

Per a protegir l'stack s'extreuen els ions de l'aigua d'entrada a la cel·la. Cal extreure els cations metàl·lics pesants (Fe, Ni i Cr) que es poden desprendre dels materials de la planta o per corrosió dins l'stack. S'utilitza un intercanviador d'ions.

A la sortida del circuit de l'ànode es realitza una separació entre  $H_2O$  i  $O_2$  amb un separador d'aigua-gas col·locat sobre l'stack que permet tancar el cicle introduint l'aigua un altre cop, expulsant l'oxigen a l'atmosfera amb una vàlvula de control per a regular la pressió

Els sensors que s'utilitzen en aquesta etapa són de puresa de l'aigua, temperatura d'entrada de l'aigua, temperatura de sortida de l'aigua amb oxigen i pressió d'entrada i de sortida [15].

### **Gestió de l'hidrogen (cicle del càtode)**

És necessària la circulació i el reciclatge de l'aigua protònica que circula a través de la membrana amb els ions  $H^+$  per electroosmosi. En algunes instal·lacions s'afegeix una bomba de circulació per a mantenir el cicle i una vàlvula de drenatge per a retornar l'aigua al cicle de l'ànode.

A la sortida del cicle del càtode es realitza una separació entre  $H_2O$  i  $H_2$  amb un separador d'aigua-gas col·locat sobre l'stack que extreu l' $H_2$  i retorna l'aigua al cicle, una vàlvula de control regularà la pressió d'aquest circuit.

Cal extreure el vapor d'aigua del gas produït fins a la puresa requerida per la pila de combustible PEM que segons la norma ISO 14.687 (*Hydrogen Fuel Quality*) és de menys de 5 ppm en volum ( $5\mu\text{ mol/mol}$ ). Aquest procés es realitza combinant un captador de gotes (*demister*), una trampa de condensació i un intercanviador de calor. Seguidament s'emmagatzema l'hidrogen en un cilindre intermedi de baixa pressió.

Després de passar pel cilindre intermedi es realitza una purificació de l' $H_2$ . S'extreu l'oxigen fins a  $5\mu\text{ mol/mol}$  (segons la norma ISO 14.687) en dues etapes, la primera consisteix en la recombinació catalítica d' $H_2$  i  $O_2$  en  $H_2O$  amb nanopartícules de Pt en un desoxidant i la segona en tornar a assecar el gas per a extreure l'aigua produïda en un assecador [15].

**Electrònica de potència**

Per a alimentar l'stack electrolític amb corrent continu cal un rectificador AC/CC (230 V i 50 Hz) monofàsic o trifàsic, depenent de la xarxa interna de l'edifici, preferiblement amb transformador inclòs. També es pot utilitzar per a alimentar les vàlvules i sensors i per a monitoritzar els nivells de corrent i tensió d'AC i de CC [15].

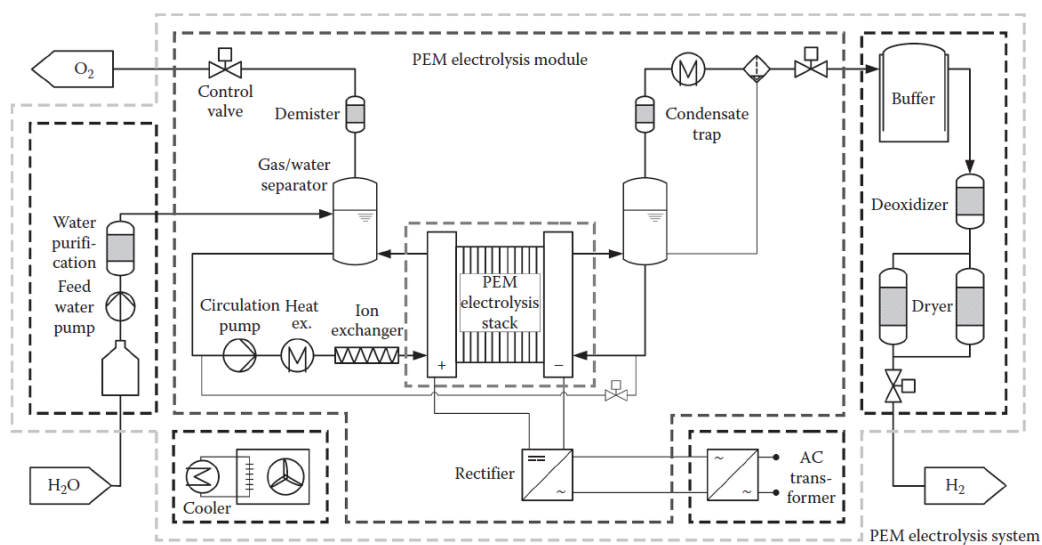


Fig. 5.2. Model esquemàtic d'un sistema per a realitzar electròlisi d'aigua tipus PEM. Font: [15]

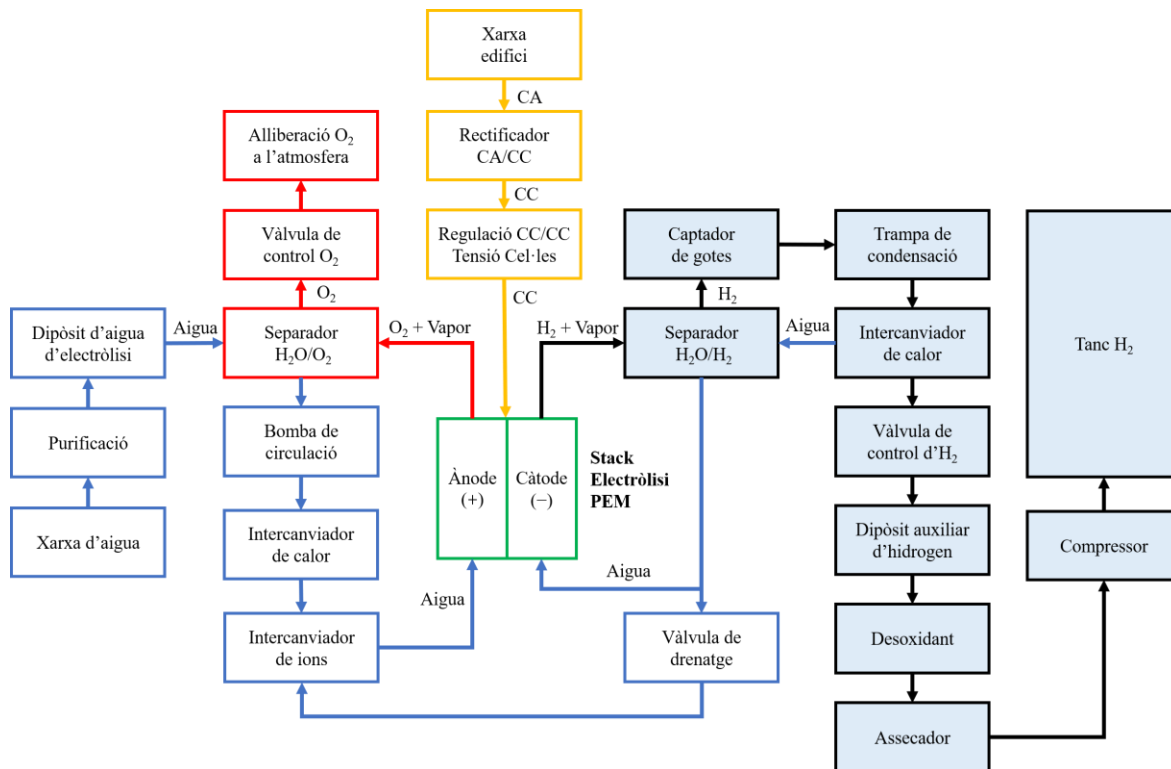


Fig. 5.3. Diagrama de blocs del sistema d'electròlisi d'aigua tipus PEM. Font: [15].

#### 5.4.2. Subsistema d'emmagatzematge d'H<sub>2</sub> comprimit

L'hidrogen produït per electròlisi s'introduirà en un cilindre d'emmagatzematge d'acer inoxidable austenític que no sigui propens a la fragilització per hidrogen [11]. La capacitat del tanc es determinarà a partir de la simulació, amb la quantitat màxima d'hidrogen acumulat.

Els sistemes que es troben a la literatura presenten els cilindres d'emmagatzematge a l'exterior com a mesura de seguretat [16].

Abans d'introduir-lo al cilindre, l'hidrogen purificat s'ha de comprimir. Aquesta compressió és idealment isotèrmica, i suposa unes pèrdues del 2,5% [11].

### 5.4.3. Subsistema de pila de combustible

Aquest subsistema té les següents entrades i sortides:

	<b>Entrades</b>	<b>Sortides</b>
<b>Ànode</b> (-)	H <sub>2</sub> gas	Corrent continu (-)
<b>Càtode</b> (+)	Aire	H <sub>2</sub> O Corrent continu (+)

Taula 5.2. Entrades i sortides de la pila de combustible.

A continuació es defineixen les tasques a realitzar pel sistema amb els elements que les compleixen:

#### Stack de cel·les de tipus PEM

L'stack de cel·les PEM és el que s'encarrega de transformar l'hidrogen emmagatzemat i l'aire de l'atmosfera en corrent continu, generant aigua i calor com a subproductes. Aquesta calor es pot utilitzar a l'habitatge aconseguint eficiències combinades, elèctrica i tèrmica, del 90%. Actualment s'assoleixen temps de vida de més de 13 anys en aplicacions de baixa potència per a habitatges, amb un temps de servei de 40.000 hores [17].

#### Gestió del combustible (H<sub>2</sub>) – Ànode (-)

La sortida de gas comprimit del cilindre d'emmagatzematge amb es controla amb una vàlvula seguida d'un filtre antipartícules per a evitar la contaminació de l'stack.

Per a reduir la pressió s'utilitzen dues vàlvules reductores que generen tres etapes de pressió, una d'alta, una d'intermèdia i una de baixa. La protecció de la pila de combustible es realitza amb dues electrovàlvules, una d'alta pressió i l'altra de baixa pressió, i una vàlvula antiretorn d'emergència.

A la sortida de gas de l'ànode hi ha un filtre de partícules i una vàlvula de purga de l'H<sub>2</sub> que s'utilitza per a controlar la pressió [18].

### Entrada de l'oxidant (aire) – Càtode (+)

Cal bombejar d'aire des de l'atmosfera amb un bufador. Aquest injecta aire en una proporció estequiomètrica entre 2,5 i 3 per a poder realitzar la reacció correctament i ha de ser capaç de contrarestar la caiguda de pressió de l'stack. Abans del bufador es col·loca un filtre de malla per a evitar que entrin objectes, i després del bufador es col·loca un filtre de partícules per a protegir l'stack.

És necessari realitzar un procés d'humidificació, l'entrada d'aire humit evita la deshidratació de l'stack causada per l'escalfament òhmico. Normalment les piles de baixa potència tenen capacitat d'humidificar-se a sí mateixes amb l'aigua que produeixen o porten un humidificador integrat. Generalment, juntament amb l'humidificador s'afegeix un intercanviador de calor per a regular la temperatura de l'stack [19] [20].

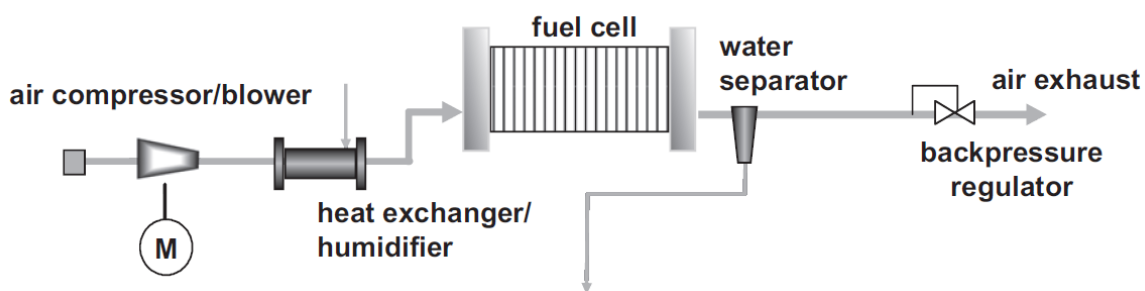


Fig. 5.4. Sistema d'entrada d'aire. Font: [19].

### Sortida d'aigua – Càtode (+)

En la separació aigua-gas de la sortida del càtode s'extreu l'aigua de l'aire d'entrada. Aquesta es pot reaprofitar per a l'electròlisi si s'instal·la una bomba de circulació per a enviar-la fins al dipòsit inicial i per al sistema d'humidificació. És necessari col·locar un filtre per a eliminar-ne partícules que es puguin haver després de l'stack o de les canalitzacions. Aquesta aigua surt de la pila de combustible a una temperatura d'aproximadament 60°C i es pot aprofitar l'energia tèrmica que conté per a l'habitatge amb un intercanviador de calor [19].



### Gestió elèctrica

Es realitza un control de la tensió de cada cel·la amb un convertidor CC/CC, perquè la sortida elèctrica no és ideal, la tensió és variable i pot respondre amb lentitud davant de canvis en la càrrega. També és important realitzar una gestió individual del voltatge de cada cel·la perquè no es pot assegurar el mateix funcionament en totes, aquest tipus de gestió és similar a un BMS d'una bateria. Quan el voltatge de la cel·la passa a ser negatiu pot provocar la oxidació de la membrana i cal canviar tot l'stack.

S'utilitza un inversor CC/CA (230 V i 50 Hz) per a convertir la tensió contínua produïda per la pila de combustible a tensió alterna utilitzable a la xarxa de l'edifici [20].

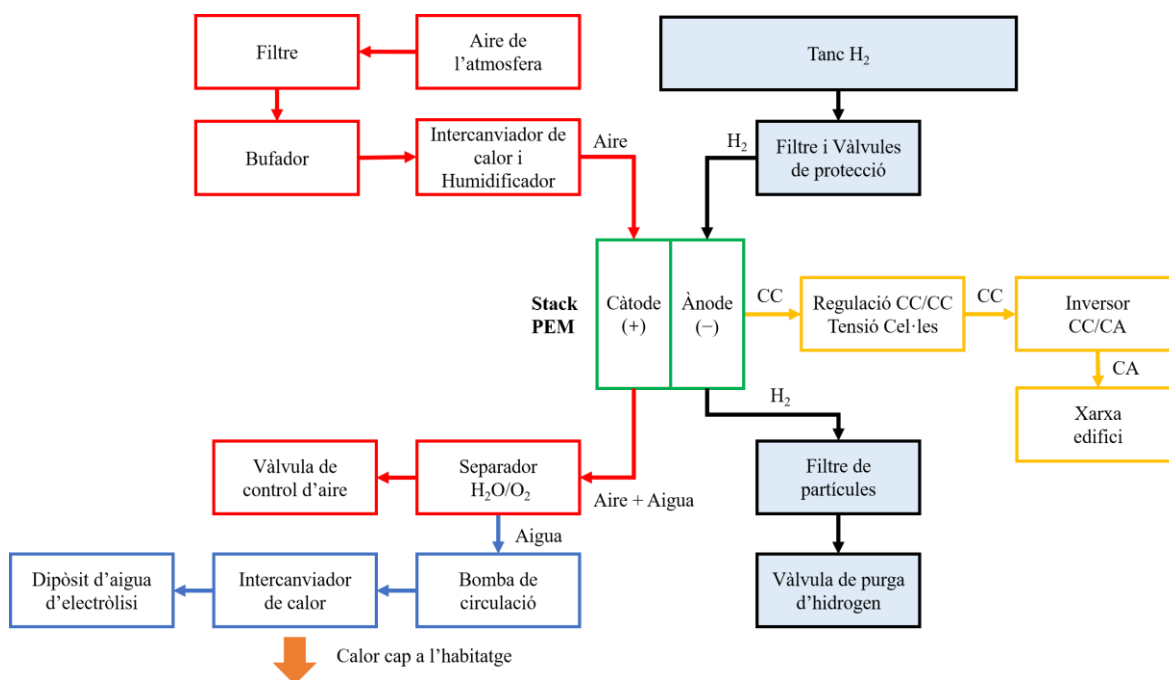


Fig. 5.5. Diagrama de blocs del sistema de la pila de combustible. Fonts: [19] [20].

#### 5.4.4. Subsistema de gestió tèrmica

Aquest subsistema s'encarrega de mantenir tant l'stack electrolític com el de la pila de combustible a la temperatura adequada per al seu funcionament i a recollir l'energia tèrmica sobrant per a aprofitar-la a l'edifici en forma d'aigua calenta. Aquesta energia tèrmica es recull del calor de l'aigua generada a la pila de combustible. En aquest projecte existeix la possibilitat d'aprofitar també l'energia tèrmica dels dos intercanviadors de calor del sistema d'electròlisi. Un sistema de micro-cogeneració com aquest en una pila de combustible

permet aprofitar al voltant del 90% de l'energia del combustible consumit, al voltant de 50% de l'energia en forma d'energia elèctrica i un 40% en energia tèrmica [17].

Els intercanviadors de calor de regulació de temperatura del sistema d'electròlisi i de l'aire d'entrada a la pila de combustible poden estar connectats tots al mateix sistema de refrigeració per a optimitzar els recursos de la instal·lació. Com a afegit es pot plantejar realitzar *energy harvesting* del calor dissipat en els aparells elèctrics per a augmentar encara més l'eficiència.

#### **5.4.5. Subsistema de ventilació**

És necessari evitar acumulacions d' $H_2$  a la zona degut a que aquest es inflamable en concentracions entre 4 % i 75 % en volum en presència d'un gas oxidant com l'oxigen. Amb tal finalitat s'instal·len sensors de fugues d'hidrogen i un sistema de ventilació en cas de detecció de concentracions altes. Cal que els dipòsits i aparells que continguin gas  $H_2$  es situïn en un entorn amb fàcil escapament vertical del gas, aquest es dissol molt ràpidament en tals condicions a causa de la seva densitat inferior a la de l'aire [21].

#### **5.4.6. Subsistema de control i adquisició de dades**

El sistema de control està format per un PLC que controla totes les variables del sistema i permet fer-ne un control automatitzat [20]. Les tasques són les següents:

- Monitorització i adquisició de dades en temps real de tots els sensors.
- Actuació sobre les vàlvules, els intercanviadors de calor, les bombes i el compressor.
- Sistema d'apagat manual.
- Circuit automàtic passiu que apagui el sistema en cas de lectures crítiques d'acumulació de gasos o pressió en algun punt del sistema.

#### **5.4.7. Instal·lació fotovoltaica**

En aquest apartat s'exposen els components que formen una instal·lació fotovoltaica domèstica de forma superficial com a complement de la simulació de producció solar que es presenta més endavant:

- Mòduls fotovoltaics: produeixen energia elèctrica en forma de corrent continu a partir de la irradiació solar.
- Cablejat fotovoltaic de corrent continu: es tracta d'uns cables de CC dissenyats per a estar instal·lats a la intempèrie i a temperatures més altes. Interconnecta les sèries de mòduls entre elles i amb l'inversor. Es determina la secció per a no superar la caiguda de tensió i l'intensitat màxima admissible segons el REBT.
- Estructura de subjecció dels mòduls: eviten que el vent separi els mòduls de la coberta on estan instal·lats. Normalment estan formades per estructures d'alumini i cargols en coberts inclinades i per contrapesos i triangles d'alumini per a determinar la inclinació en cobertes planes.
- Inversor fotovoltaic: converteix el corrent continu produït als mòduls en corrent altern utilitzable a la xarxa interna de l'edifici. Té la funció d'optimitzar el punt de treball d'intensitat i tensió de les sèries de mòduls.
- Cablejat de CA: connecta l'inversor amb la xarxa interna de l'edifici. Es determina la secció per a no superar la caiguda de tensió i l'intensitat màxima admissible segons el REBT.
- Monitoratge: permet fer un seguiment del funcionament de la instal·lació i la solució de problemes com l'obertura d'un interruptor o la pèrdua de producció en alguna sèrie de mòduls.
- Aparellatge: conjunt de proteccions elèctriques tant del tram de corrent continu com el d'altern. Inclou protectors de sobretensions permanents i transitòries, fusibles, interruptors magnetotèrmics i interruptors diferencials.
- Xarxa de terres: connecta els mòduls, la estructura i tots els elements que ho requereixin a la presa de terra de l'edifici on es realitza la instal·lació.

Per a aprofundir més en la matèria es recomana la lectura del *Quadern Pràctic Número 4: Energia Solar Fotovoltaica* de l'Institut Català de l'Energia.

#### 5.4.8. Llistat de components del sistema

	Components del sistema
<b>EL</b>	Stack de cel·les electrolítiques tipus PEM
<b>EL</b>	Purificador d'osmosi inversa
<b>EL</b>	Bomba d'alimentació d'aigua
<b>EL</b>	Dipòsit d'aigua per a l'electròlisi
<b>EL – Circuit ànode</b>	Bomba de circulació
<b>EL – Circuit ànode</b>	Intercanviador de calor (opcional)
<b>EL – Circuit ànode</b>	Intercanviador d'ions
<b>EL – Circuit ànode</b>	Separador aigua-gas
<b>EL – Circuit ànode</b>	Vàlvula de control de l'oxigen
<b>EL – Circuit càtode</b>	Bomba de circulació (opcional)
<b>EL – Circuit càtode</b>	Vàlvula de drenatge d'aigua
<b>EL – Circuit càtode</b>	Separador aigua-gas
<b>EL – Circuit càtode</b>	Vàlvula de control de l'hidrogen
<b>EL – Circuit càtode</b>	Captador de gotes
<b>EL – Circuit càtode</b>	Trampa de condensació
<b>EL – Circuit càtode</b>	Intercanviador de calor
<b>EL – Circuit càtode</b>	Cilindre d'emmagatzematge intermedi a baixa pressió
<b>EL – Circuit càtode</b>	Desoxidant
<b>EL – Circuit càtode</b>	Assecador
<b>EL – Circuit càtode</b>	Vàlvula final d'hidrogen
<b>Em</b>	Compressor
<b>Em</b>	Cilindre d'emmagatzematge d'H <sub>2</sub> a 200 bar

<b>PC</b>	Stack de la pila de combustible PEM
<b>PC - Ànode</b>	Filtre de partícules d'entrada
<b>PC - Ànode</b>	2 Vàlvules reductores de pressió
<b>PC - Ànode</b>	2 Electrovàlvules de protecció
<b>PC - Ànode</b>	Vàlvula antiretorn d'emergència
<b>PC - Ànode</b>	Filtre de partícules de sortida
<b>PC - Ànode</b>	Vàlvula de purga d'H <sub>2</sub>
<b>PC - Càtode</b>	Filtre de malla d'entrada d'aire
<b>PC - Càtode</b>	Bufador
<b>PC - Càtode</b>	Filtre de partícules
<b>PC - Càtode</b>	Humidificador
<b>PC - Càtode</b>	Intercanviador de calor de regulació de la cel·la
<b>PC - Càtode</b>	Separador aire - aigua
<b>PC - Càtode</b>	Vàlvula de control d'aire
<b>PC - Càtode</b>	Bomba de circulació d'aigua
<b>PC</b>	Intercanviador de calor de l'aigua de sortida
<b>PC</b>	Convertidor CC/CC
<b>PC</b>	Inversor CC/CA
<b>Control + SAD</b>	PLC
<b>Control + SAD</b>	Sistema d'adquisició de dades
<b>Control + SAD</b>	Sensors
<b>Control + SAD</b>	Comunicacions
<b>Infraestructura</b>	Cablejat elèctric
<b>Infraestructura</b>	Aparellatge elèctric
<b>Infraestructura</b>	Canalitzacions de gas i aigua
<b>FV</b>	Mòduls solars
<b>FV</b>	Estructura de suport dels mòduls

<b>FV</b>	Cablejat elèctric fotovoltaic
<b>FV</b>	Inversor fotovoltaic
<b>FV</b>	Cablejat de CA
<b>FV</b>	Aparellatge elèctric

Taula 5.3. Llistat d'elements necessaris per al sistema. EL per al sistema d'electròlisi, PC per al de pila de combustible, SAD per al sistema d'adquisició de dades i FV per a la instal·lació fotovoltaica.

### 5.4.9. Justificació de les eleccions en relació a la topologia del sistema

En quant a l'estructura elèctrica es presenten dues alternatives principals. La primera és la utilització d'un bus de CC que interconnecti la pila, l'electrolitzador i la fotovoltaica, utilitzant així un sol inversor per a introduir l'energia a la xarxa. La segona, que és la present en aquest projecte, està basada en connectar la fotovoltaica, la pila i l'electrolitzador amb els seus propis conversors de potència a la xarxa de l'edifici. S'ha escollit la segona per a augmentar l'eficiència de la instal·lació fotovoltaica, ja que es preveu que aquesta sigui la major aportadora d'energia directa per al consum de l'edifici.

S'ha escollit refrigeració centralitzada per a reduir el nombre de components de la instal·lació i tenir la capacitat d'aprofitar tota l'energia tèrmica possible produïda per les reaccions com a font de cogeneració.

S'ha decidit reaprofitar l'aigua generada a la pila de combustible, i reciclar tota l'aigua possible de l'electròlisi per a augmentar el respecte del sistema amb el medi ambient, ja que és el principal motiu d'aquest estudi.

No s'ha decidit convertir tota la producció fotovoltaica en hidrogen perquè aquest procés seria menys eficient que consumir directament l'energia generada per aquesta.

Finalment, no s'han dimensionat els sistemes tèrmic, elèctric i de control i adquisició de dades perquè requeriria de molt més temps de realització del projecte i l'adquisició de molts més coneixements. Aquestes àrees queden com a línies de futur en l'àrea d'energia d'hidrogen.

## 5.5. Metodologia

En aquest apartat s'explica el procediment seguit per a la realització de la simulació de producció a partir de l'estimació dels excedents d'una instal·lació solar per a un habitatge i de l'estat de l'art en producció, emmagatzematge i extracció d'energia de l'hidrogen amb les tecnologies seleccionades. En cada subapartat s'explicarà el model que s'ha utilitzat per a representar els diferents subsistemes a la simulació. La simulació es realitza en un full de càlcul de MS Excel.

L'estimació de la producció prevista per la planta fotovoltaica es du a terme mitjançant programes de càlcul, en aquest cas el software *PV\*SOL*® de l'empresa *Valentin Software*® [22], doncs aquest està disponible a l'empresa on treballa el projectista. Aquest programa calcula la producció elèctrica de la instal·lació a partir dels components que la formen i de dades històriques de temperatura i radiació solar de la ubicació seleccionada.

El programa també genera corbes de consum estàndard per a simular els excedents que es produeixen en diferents tipus d'edificis per a poder fer el dimensionament de la instal·lació. En aquest cas s'ha generat una corba de consum d'un habitatge unifamiliar a partir del consum mitjà a l'estat espanyol d'un habitatge d'aquest tipus, que és 17.012 kWh/any segons dades de l'IDAE (*Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía*) [23]. S'ha escollit un habitatge unifamiliar i no un bloc de pisos per l'espai requerit per aquest tipus d'instal·lació i el major consum energètic d'aquest tipus d'habitatge. S'han situat vacances del 15 de juliol al 7 d'agost per a veure la capacitat d'acumulació d'energia del sistema.

També s'introdueixen al programa les següents dades:

- Ubicació geogràfica de la instal·lació: Mataró.
- Potència pic dels mòduls fotovoltaics: 300 Wp.
- Quantitat de mòduls: 20 unitats.
- Potència nominal de l'inversor: 5 kW.
- Pèrdues elèctriques en el cablejat: 3%.
- Pèrdues per embrutiment dels mòduls: 3% anual.

Amb aquesta informació el programa genera un arxiu en format CSV i un informe, aquest últim es pot trobar als annexos del projecte. L'arxiu CSV conté les dades de producció energètica i consum de l'habitatge amb resolució horària. Aquestes dades són el punt de partida de la simulació dissenyada en el projecte.

$P_{(i)}$  i  $C_{(i)}$  són la producció energètica de la instal·lació fotovoltaica i el consum energètic de l'habitatge durant la hora (i). A partir d'aquestes magnituds es calculen els excedents  $Ex_{(i)}$  generats durant aquesta hora amb l'expressió següent:

$$Ex_{(i)} = \begin{cases} 0, & P_{(i)} \leq C_{(i)} \\ P_{(i)} - C_{(i)}, & P_{(i)} > C_{(i)} \end{cases} \quad (5.1)$$

També es pot determinar la importació d'energia de la xarxa en cas de disposar només de la instal·lació fotovoltaica.  $Im_{(i)}$  és la importació d'energia que seria necessària durant la hora (i):

$$Im_{(i)} = \begin{cases} 0, & P_{(i)} \geq C_{(i)} \\ C_{(i)} - P_{(i)}, & P_{(i)} < C_{(i)} \end{cases} \quad (5.2)$$

En base a l'estat de l'art de l'electròlisi amb tecnologia PEM s'ha determinat que es requereixen 58 kWh per a produir un quilogram d'hidrogen gasós. A partir dels excedents es calculen els quilograms d' $H_2$  generat pel sistema d'electròlisi després de reduir la quantitat d'energia per l'eficiència del rectificador que alimenta l'stack, que s'ha considerat del 98% [24].

En aquesta etapa s'ha calculat la massa d' $H_2$  produïda durant la hora (i)  $M_{H(i)}$  a partir dels excedents generats durant aquell mateix període de temps.

$$M_{H(i)} = Ex_{(i)} \cdot \frac{1 \text{ kg } H_2}{58 \text{ kWh}} \cdot 0,98 \quad (5.3)$$

En base a una pèrdua del 2,5% d'energia per a comprimir l' $H_2$  fins a 200 bar [11], i al valor calorífic inferior d'aquest gas de 33 kWh/kg se'n determina el contingut energètic. La



magnitud  $LHV_{(i)}$  calculada en aquest pas representa el contingut energètic de l'hidrogen generat durant la hora (i):

$$LHV_{(i)} = M_{H(i)} \cdot \frac{33 \text{ kWh}}{1 \text{ kg } H_2} \cdot 0,975 \quad (5.4)$$

La quantitat d'energia acumulada en el dipòsit en forma d' $H_2$  es calcula amb les següents expressions:

- Quantitat d' $H_2$  acumulat en el dipòsit en unitats d'energia en la primera hora de funcionament  $LHV_{AC(0)}$ :

$$LHV_{AC(0)} = LHV_{(0)} \quad (5.5)$$

- Energia elèctrica produïble a partir del valor acumulat al dipòsit  $EPC_{P(i)}$ , basada l'estat de l'art en eficiència elèctrica d'un sistema de micro-cogeneració de petita escala, que és d'un 50% [17]:

$$EPC_{P(i)} = LHV_{AC(i)} \cdot 0,5 \quad (5.6)$$

- Energia elèctrica produïda durant una hora per la pila de combustible  $EPC_{(i)}$  amb un llindar inferior de 2W per a l'arrencada:

$$EPC_{(i)} = \begin{cases} Im_{(i)}, & EPC_{P(i)} \geq Im_{(i)} \\ EFC_{P(i)}, & EPC_{P(i)} < Im_{(i)} \end{cases} \quad (5.7)$$

- Quantitat d' $H_2$  acumulat en el dipòsit en unitats d'energia  $LHV_{AC(i)}$ :

$$LHV_{AC(i)} = LHV_{AC(i-1)} - EPC_{(i-1)} \cdot \frac{1}{0,5} + LHV_{(i)} \quad (5.8)$$

L'energia tèrmica produïda durant una hora per la pila de combustible es pot calcular amb l'eficiència tèrmica d'un sistema de micro-cogeneració de petita escala, que és d'un 40% [17]:

$$QPC_{(i)} = EPC_{(i)} \cdot \frac{0,4}{0,5} \quad (5.9)$$

## 5.6. Resultats de la simulació i dimensionament dels components principals

Els resultats de la simulació són la producció d'H<sub>2</sub>, el nivell del dipòsit i la producció energètica de la pila de combustible en unitats d'energia. La conversió entre massa d'hidrogen i energia es calcula amb el seu LHV, 33 kWh/kg.

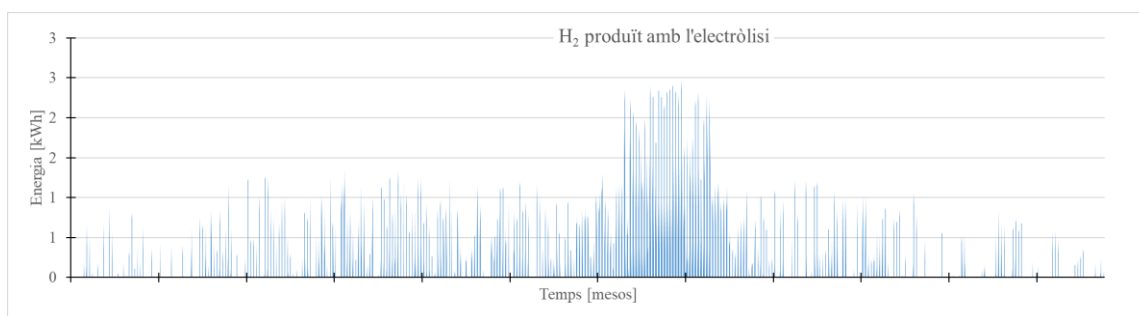


Fig. 5.6. Hidrogen produït durant un any, en unitats d'energia i amb resolució horària segons la simulació.

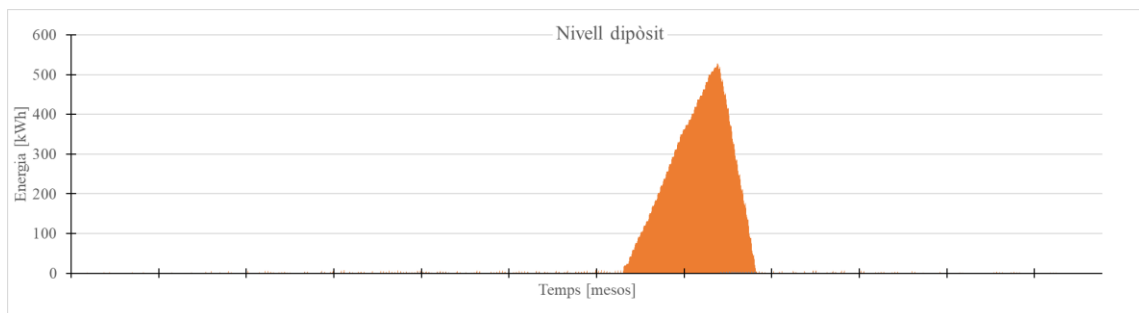


Fig. 5.7. Hidrogen acumulat al dipòsit durant un any, en unitats d'energia i amb resolució horària segons la simulació.

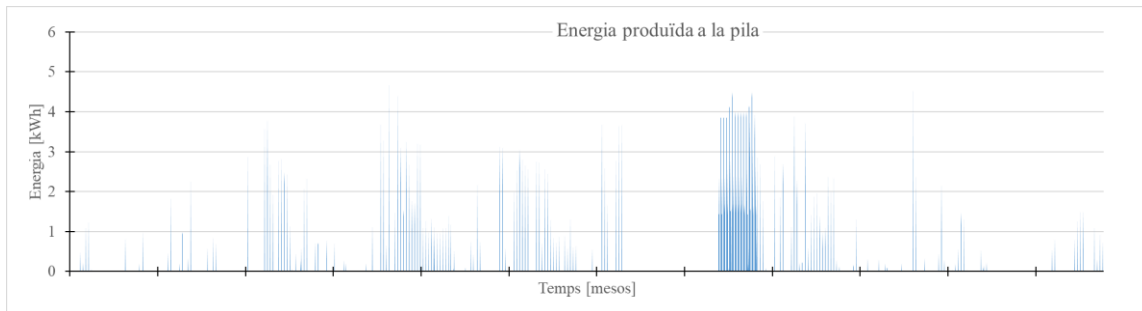


Fig. 5.8. Energia produïda per la pila de combustible durant un any, en unitats d'energia i amb resolució horària segons la simulació.

El dimensionament dels components és el següent:

- Instal·lació fotovoltaica: la potència màxima utilitzada a l'habitatge és de 4,9 kW, per assegurar-se de disposar d'excedents per a acumular s'ha sobredimensionat lleugerament fins a 6 kWp de potència instal·lada. Aquesta potència es pot assolir amb 20 mòduls de 300 Wp.
- Stack electrolític: ha de ser capaç d'emmagatzemar els excedents que li arribin, a partir del valor dels excedents màxims s'ha decidit que la potència sigui de 4,6 kW. A partir de la potència màxima es pot calcular la intensitat en CA, de 20 A, i convertir-la a 24V a partir de la eficiència del rectificador (98%), resultant en una intensitat en CC d'aproximadament 200 A. Considerant que la densitat de corrent és de 2 A/cm<sup>2</sup> [17] l'àrea total de l'stack és de 100 cm<sup>2</sup>.
- Dipòsit: ha tenir capacitat per emmagatzemar el valor màxim acumulat, per tant s'utilitzarà un dipòsit de 1.000 litres.
- Pila de combustible: s'ha dimensionat a partir del valor màxim de potència elèctrica generada en una hora, en aquest cas 3 kW.

<b>Magnitud</b>	<b>Valor</b>
Consum elèctric anual de l'habitatge	17.012,00 kWh
Potència màxima demanada anual	4,9 kW
Producció d'energia solar anual	8.724,26 kWh
Excedents d'energia solar anuals	2.411,88 kWh
Valor màxim d'excedents en una hora	4,54 kWh
Cobertura solar anual	37,11 %
Autoconsum solar anual	72,35 %
Producció total d'H <sub>2</sub> anual	40,75 kg
Contingut energètic	1.324,32 kWh
Màxima quantitat d'H <sub>2</sub> emmagatzemada	15,85 kg
Volum a 200 bar	958,48 litres (calculat amb la llei de gasos ideals a 20°C i 200 bar)
Producció d'energia elèctrica a la pila	662,16 kWh
Valor màxim d'energia elèctrica produïda a la pila en una hora	2,68 kWh
Producció d'energia tèrmica a la pila	529,73 kWh
Producció total a la pila	1.191,89 kWh

Taula 5.4. Valors obtinguts de la simulació.

En els següents subapartats es mostren les gràfiques resultants mes a mes com a ajuda per a l'anàlisi dels resultats. La quantitat d'energia aportada per la pila que es mostra és la suma de l'energia elèctrica i la tèrmica.

### 5.6.1. Resultats de gener

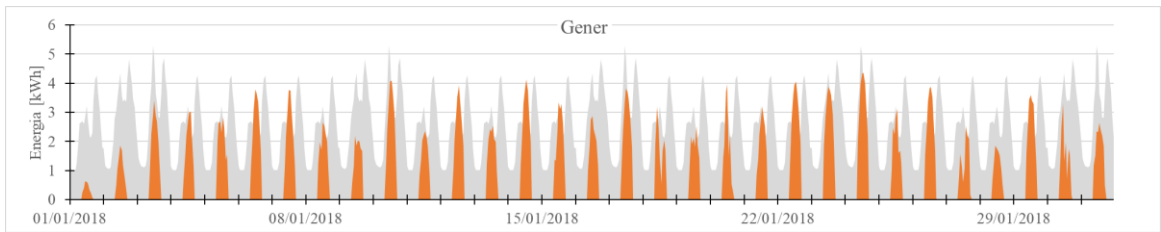


Fig. 5.9. Resultats de la simulació de gener. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l’habitatge en gris.

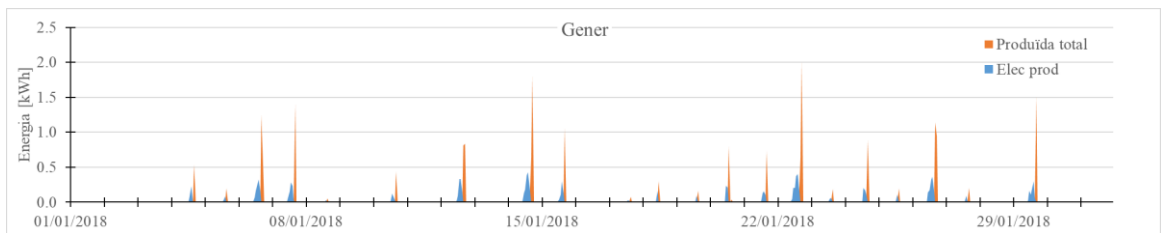


Fig. 5.10. Resultats de la simulació de gener. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d’hidrogen per electròlisi en blau..

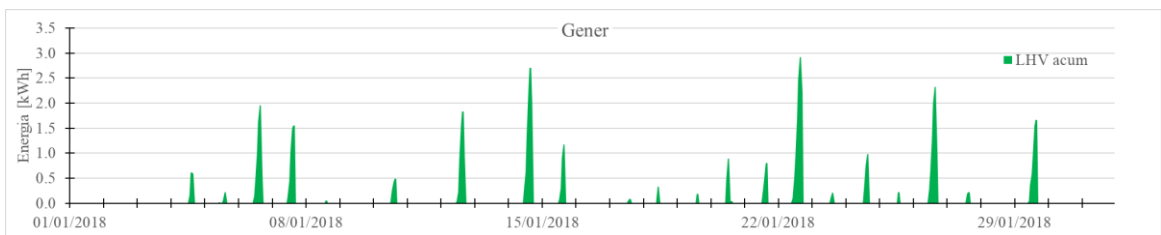


Fig. 5.11. Resultats de la simulació de gener. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d’energia.

## 5.6.2. Resultats de febrer

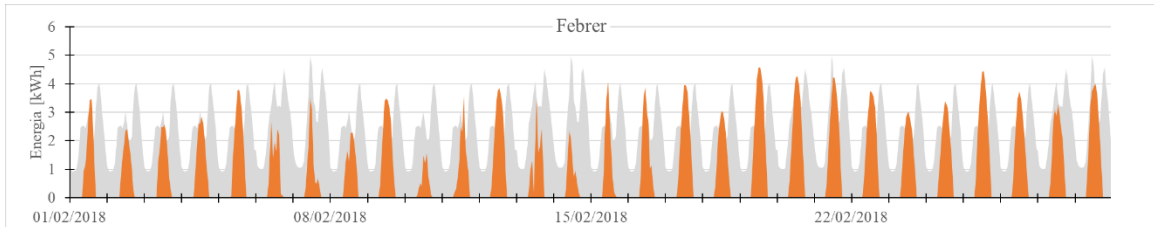


Fig. 5.12. Resultats de la simulació de febrer. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris.

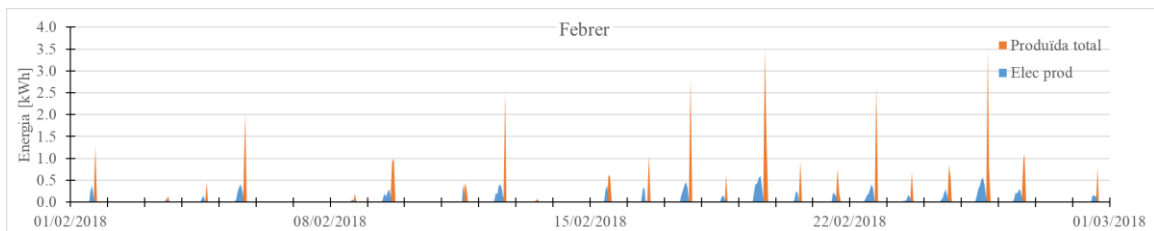


Fig. 5.13. Resultats de la simulació de febrer. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau.

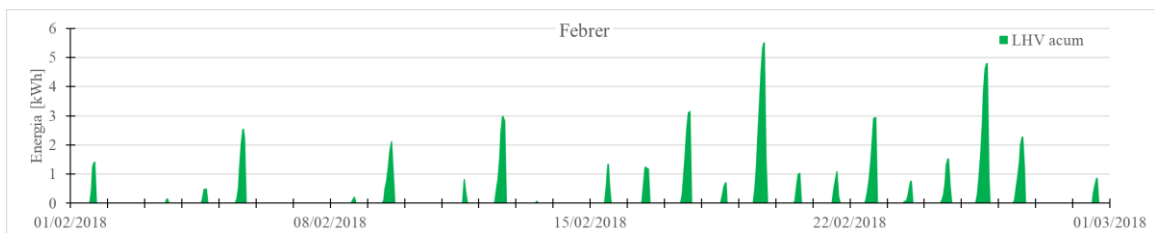


Fig. 5.14. Resultats de la simulació de febrer. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia.

### 5.6.3. Resultats de març

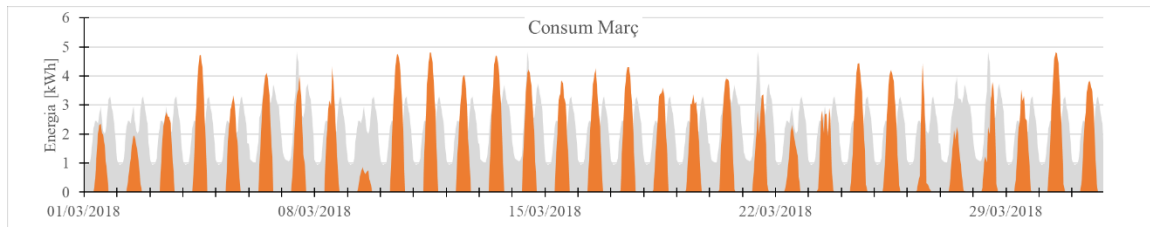


Fig. 5.15. Resultats de la simulació de març. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l’habitatge en gris.

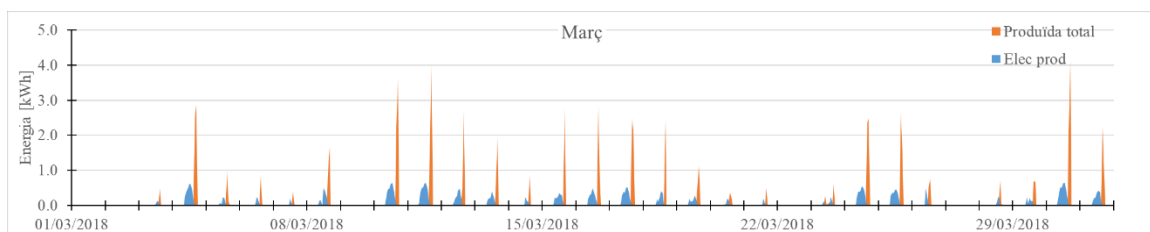


Fig. 5.16. Resultats de la simulació de març. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d’hidrogen per electròlisi en blau.

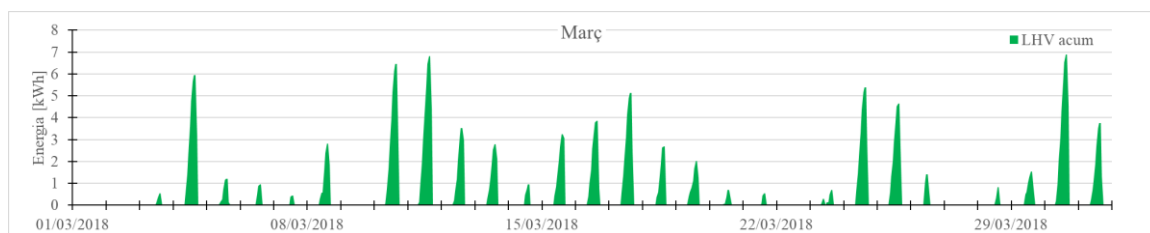


Fig. 5.17. Resultats de la simulació de març. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d’energia.

#### 5.6.4. Resultats d'abril

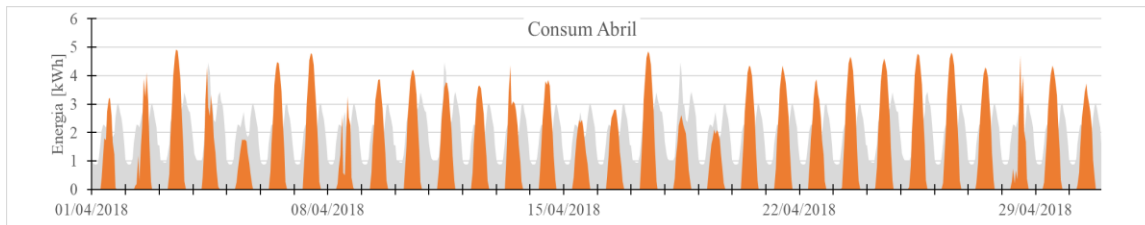


Fig. 5.18. Resultats de la simulació d'abril. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris.

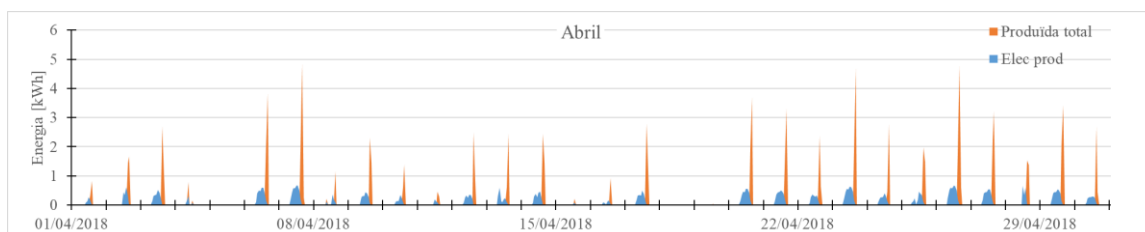


Fig. 5.19. Resultats de la simulació d'abril. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau.

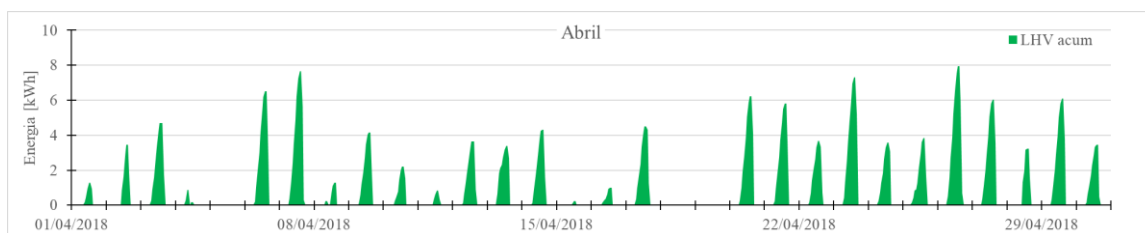


Fig. 5.20. Resultats de la simulació d'abril. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia.



### 5.6.5. Resultats de maig

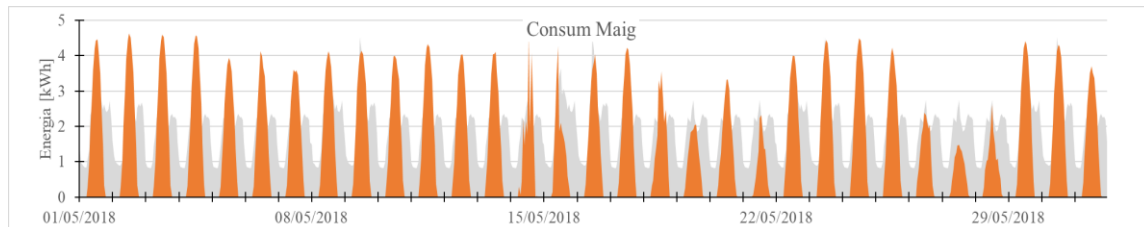


Fig. 5.21. Resultats de la simulació de maig. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l’habitatge en gris.

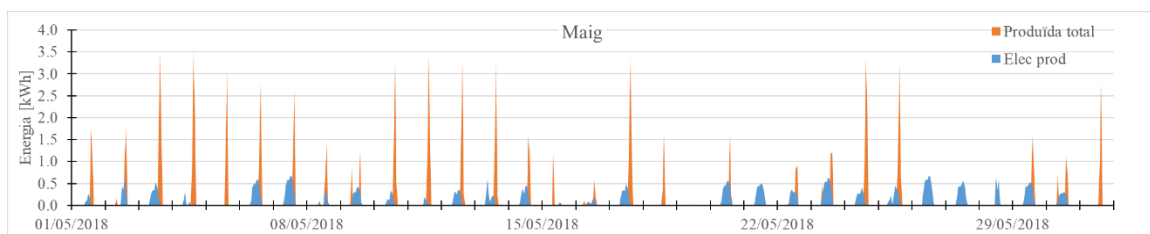


Fig. 5.22. Resultats de la simulació de maig. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d’hidrogen per electròlisi en blau.

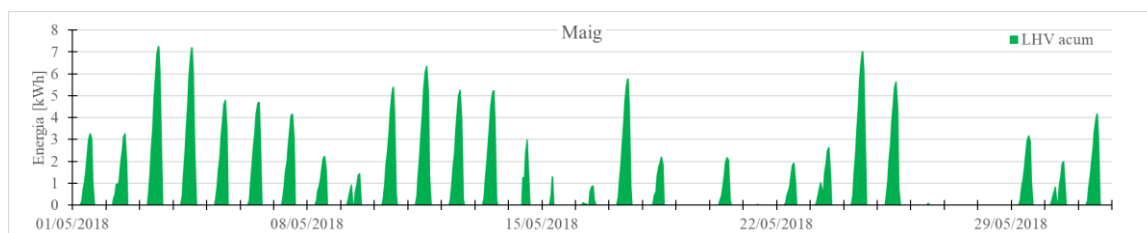


Fig. 5.23. Resultats de la simulació de maig. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d’energia.

### 5.6.6. Resultats de juny

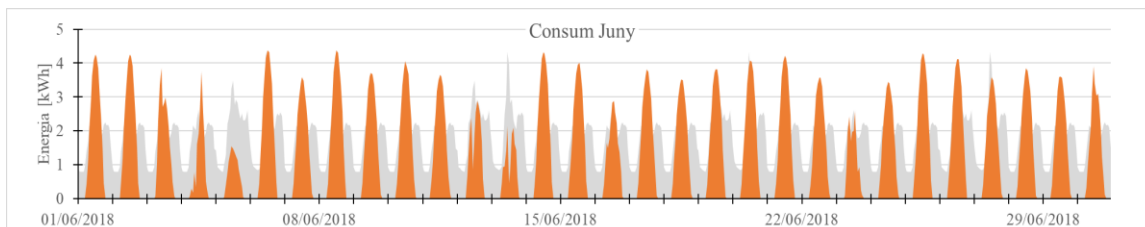


Fig. 5.24. Resultats de la simulació de juny. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris.

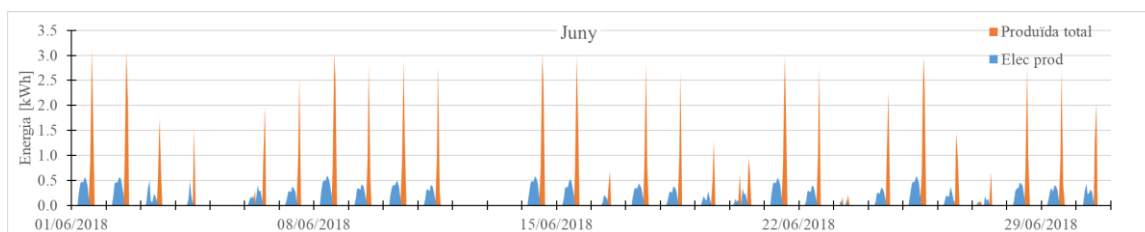


Fig. 5.25. Resultats de la simulació de juny. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau.

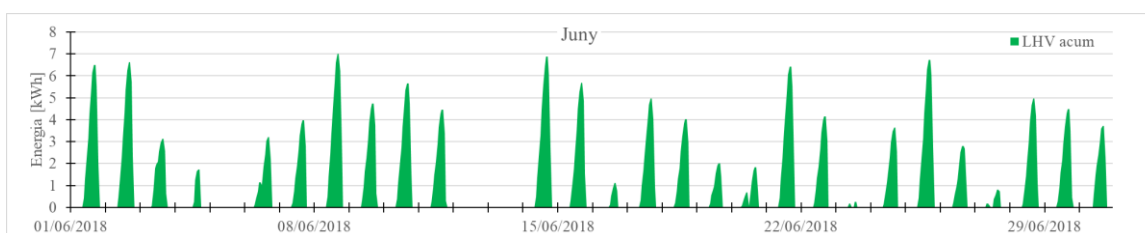


Fig. 5.26. Resultats de la simulació de juny. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia.

### 5.6.7. Resultats de juliol

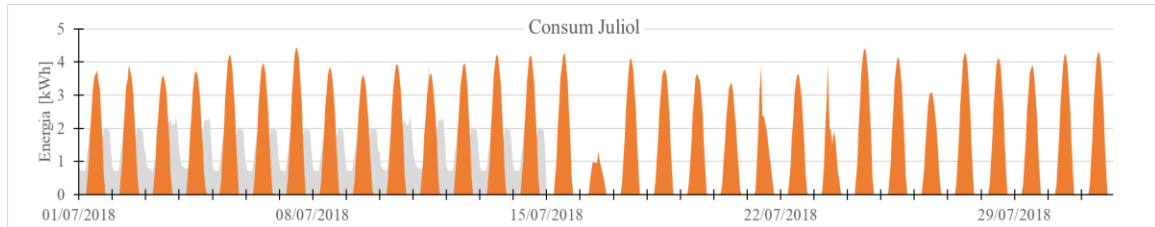


Fig. 5.27. Resultats de la simulació de juliol. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l’habitatge en gris.

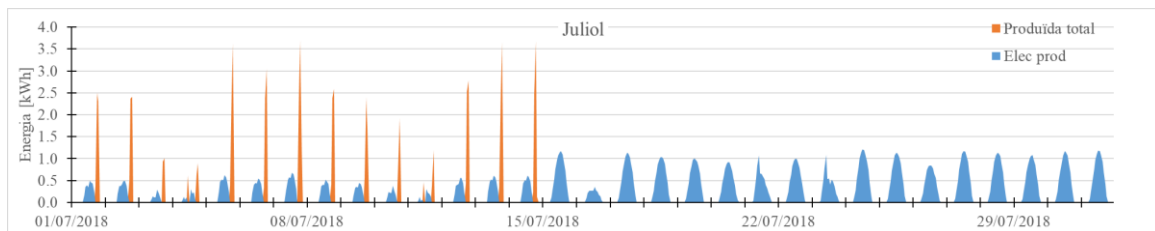


Fig. 5.28. Resultats de la simulació de juliol. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d’hidrogen per electròlisi en blau.

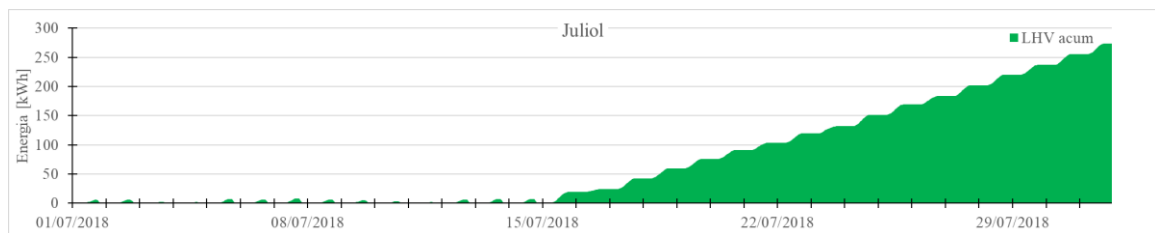


Fig. 5.29. Resultats de la simulació de juliol. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d’energia.

### 5.6.8. Resultats d'agost

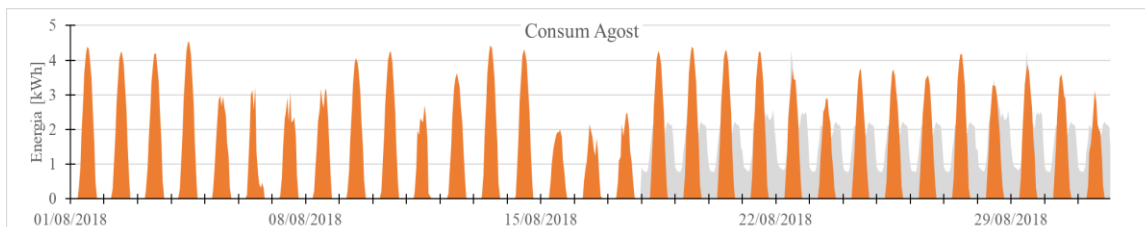


Fig. 5.30. Resultats de la simulació d'agost. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris.

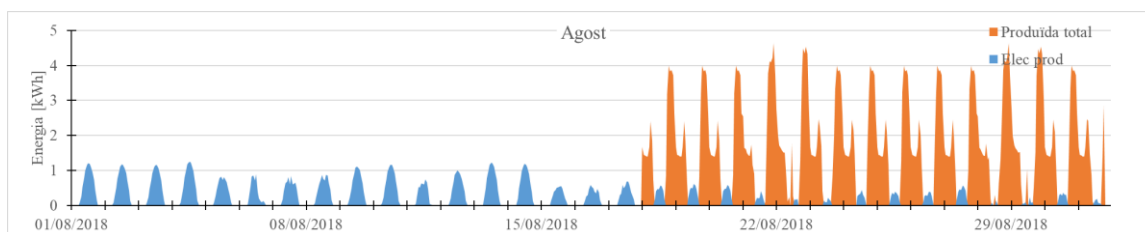


Fig. 5.31. Resultats de la simulació d'agost. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau.

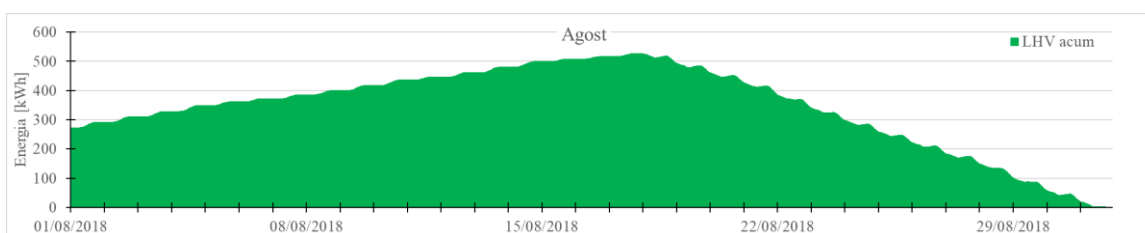


Fig. 5.32. Resultats de la simulació d'agost. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia.

### 5.6.9. Resultats de setembre

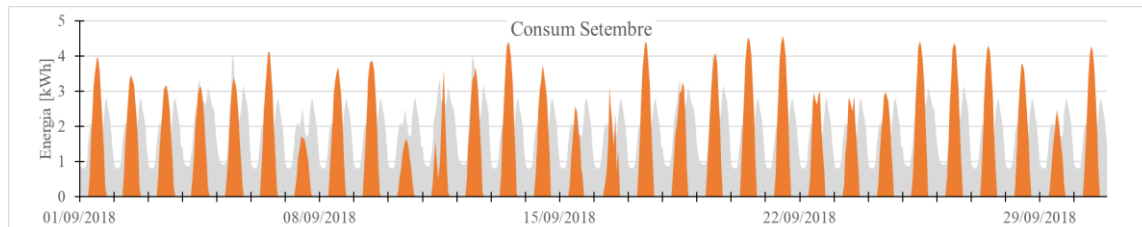


Fig. 5.33. Resultats de la simulació de setembre. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l’habitatge en gris.

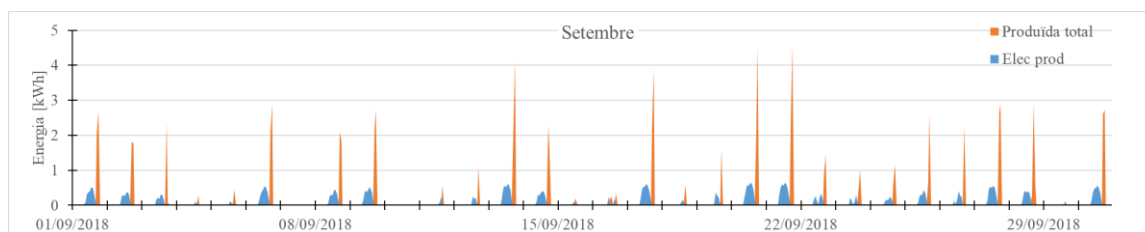


Fig. 5.34. Resultats de la simulació de setembre. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d’hidrogen per electròlisi en blau.

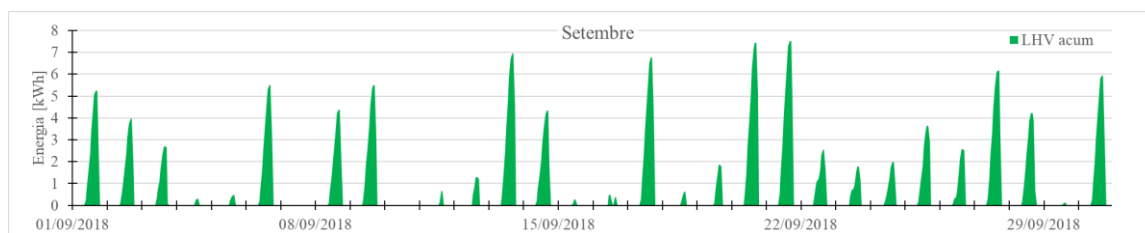


Fig. 5.35. Resultats de la simulació de setembre. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d’energia.

### 5.6.10. Resultats d'octubre

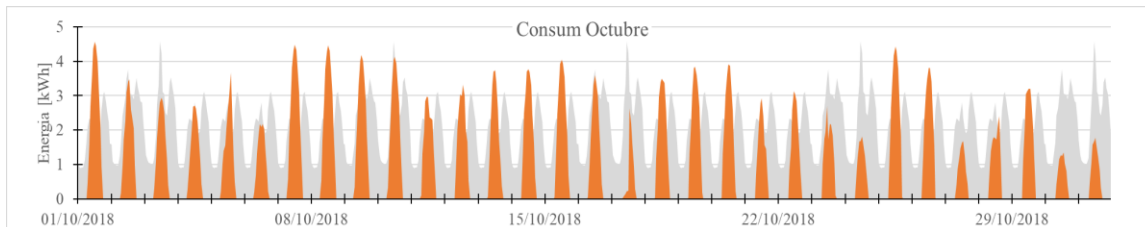


Fig. 5.36. Resultats de la simulació d'octubre. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris.

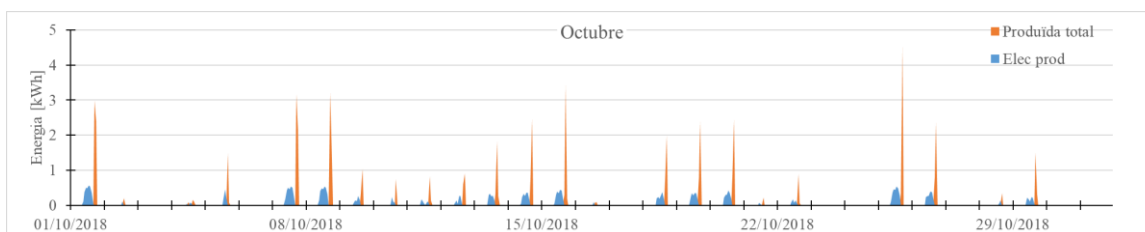


Fig. 5.37. Resultats de la simulació d'octubre. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau.

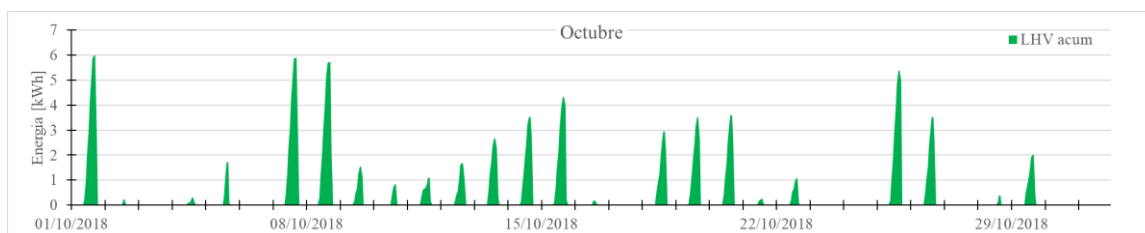


Fig. 5.38. Resultats de la simulació d'octubre. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia.

### 5.6.11. Resultats de novembre

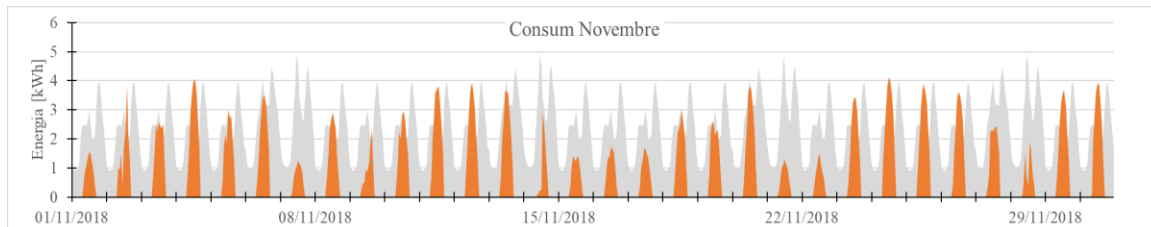


Fig. 5.39. Resultats de la simulació de novembre. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l’habitatge en gris.

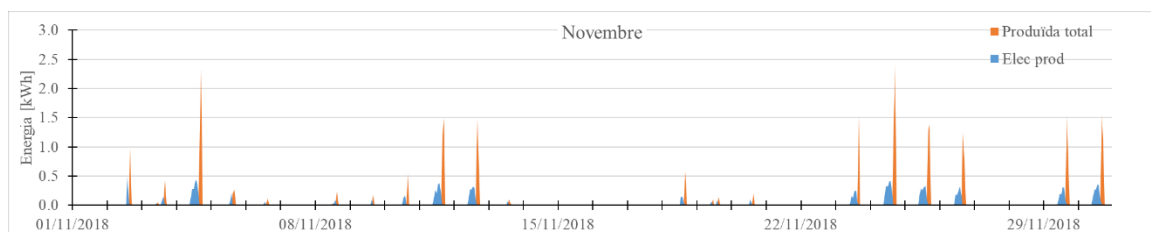


Fig. 5.40. Resultats de la simulació de novembre. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d’hidrogen per electròlisi en blau.

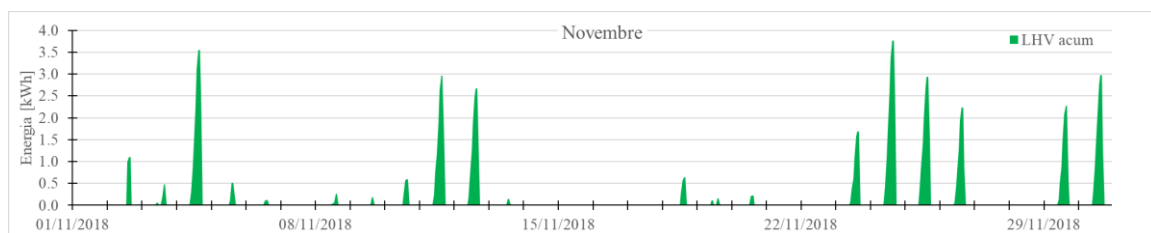


Fig. 5.41. Resultats de la simulació de novembre. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d’energia.

### 5.6.12. Resultats de desembre

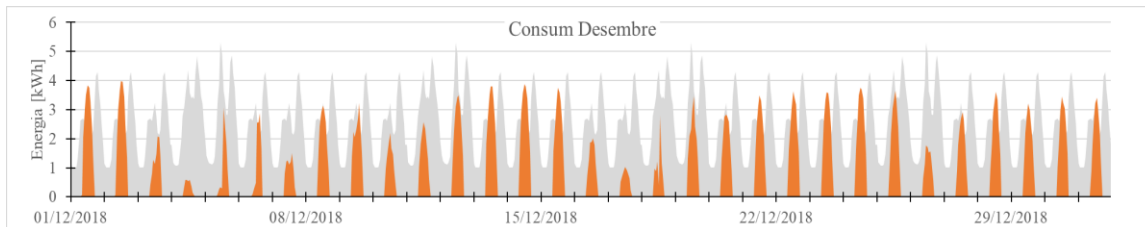


Fig. 5.42. Resultats de la simulació de desembre. Producció fotovoltaica en taronja i consum de l'habitatge en gris.

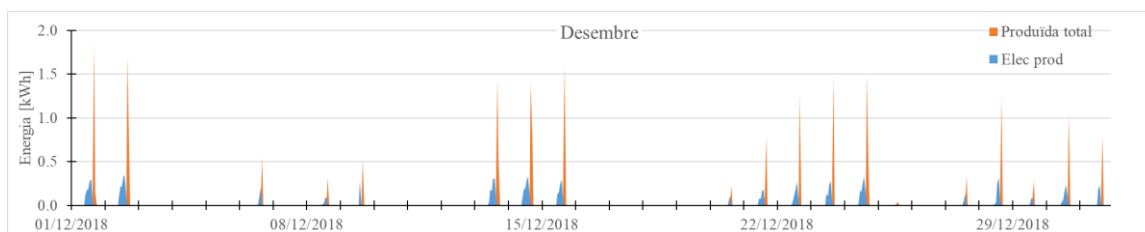


Fig. 5.43. Resultats de la simulació de desembre. Producció de la pila de combustible en taronja i generació d'hidrogen per electròlisi en blau.

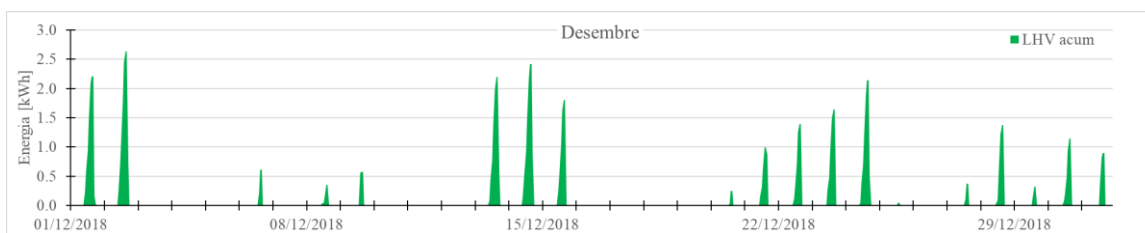


Fig. 5.44. Resultats de la simulació de desembre. Hidrogen acumulat al tanc en unitats d'energia.



### 5.6.13. Anàlisi dels resultats

Tal com es pot veure a les gràfiques el sistema no és capaç d'acumular quantitats significatives d'energia en el dia a dia. Només en el període en que coincideix amb les vacances d'estiu (de 15 de juliol a 7 d'agost) es produeix una acumulació significativa d'hidrogen, ja que es combina un període sense consum amb la temporada amb més irradiació solar de l'any i, per tant, en la que la fotovoltaica produeix més energia. S'ha decidit la col·locació de les vacances en aquesta època d'estiu per a veure el màxim potencial del sistema.

Fent diverses proves s'ha vist que per a generar una acumulació significativa s'ha de sobredimensionar molt la potència de la instal·lació fotovoltaica per a augmentar els excedents, però aquest augment no és viable per les limitacions d'espai en un habitatge.

Com a conclusió es pot extreure que el sistema no compleix el seu objectiu, perquè tot i emmagatzemar excedents, les quantitats d'energia que aporta a l'habitatge (inferior al 4% del consum) no són significatives. El que es busca quan s'utilitza hidrogen en comptes de bateries és disposar d'energia per a períodes llargs de temps, i la major part de l'ús de l'energia es produeix a les properes hores al seu emmagatzematge, buidant el dipòsit completament a gairebé cada cicle. L'eficiència elèctrica d'una bateria d'ió liti està al voltant del 95%, el seu preu és molt menor en relació a la capacitat d'emmagatzematge i es tracta d'una solució present en el mercat, per tant, no es considera que l'acumulació d'energia en forma d'hidrogen renovable per a habitatges pugui competir amb aquestes [25].

Una possible línia de futur per al sistema és l'estudi de viabilitat d'aquest en plantes industrials o edificis públics, com per exemple escoles. Aquest últim cas és interessant perquè tenen vacances a l'estiu, el període en que les instal·lacions fotovoltaïques presenten la seva màxima producció. Totes aquestes possibles aplicacions presenten la característica de disposar de molt més espai per a instal·lar potència fotovoltaica.



## 6. Planificació

### 6.1. Planificació inicial

Tot i que se seguirà un procés iteratiu per al disseny del sistema aquestes son les tasques generals a realitzar en el desenvolupament del projecte:

1. Revisió de la normativa per a una instal·lació d'aquest tipus.
2. Llistat dels possibles productes a utilitzar en el disseny:
  - a. Cel·la electrolítica PEM i sistemes complementaris.
  - b. Tanc d'emmagatzematge d' $H_2$  gasós i sistemes complementaris.
  - c. Pila de combustible PEM i sistemes complementaris.
  - d. Sistema de gestió elèctrica i electrònica de potència.
  - e. Sistema de monitorització i comunicacions.
  - f. Material d'interconnexió per al conjunt de la instal·lació.
3. Dimensionat de la instal·lació:
  - a. Estimar consum d'un habitatge.
  - b. Estimar producció d'una instal·lació fotovoltaica.
  - c. Estimar producció d' $H_2$  gasós per part de la cel·la electrolítica a partir dels excedents d'energia renovable.
  - d. Estimar capacitat necessària del tanc un funció del punt anterior.
  - e. Estimar la potència necessària de la pila d'hidrogen en funció de la demanda d'energia de l'habitatge i la disponibilitat d' $H_2$  en el tanc.
4. Disseny final del sistema.

S'han pres les següents consideracions a l'hora de realitzar la planificació:

- L'assignació del projecte és el dia 05/11/2018.
- L'entrega de l'avantprojecte és el dia 11/02/2019.
- L'entrega final és el dia 13/06/2019.

Els recursos disponibles es poden veure en la següent taula, s'han considerat diferents tipus de treball segons la tipologia de la tasca realitzada..

<b>Codi</b>	<b>Descripció</b>
1.1	Hores de projectista destinades a la cerca d'antecedents i informació prèvia
1.2	Hores de projectista destinades a la definició i plantejament de la solució
1.3	Hores de projectista destinades al desenvolupament i disseny del sistema
1.4	Hores de projectista destinades a la simulació i anàlisi dels resultats
1.5	Hores de projectista destinades a l'elaboració escrita i edició dels documents del projecte

Taula 6.1. Recursos per a realitzar el projecte.

A les següents pàgines es mostra l'estructura del treball realitzat i el diagrama de Gantt de la planificació inicial del projecte. Als diagrames de Gantt es pot veure el camí crític en vermell.

A la següent taula es pot veure l'estructura que segueix la planificació del treball:

Tasques				
Núm.	Tasca	Hores	Predecessores	Recurs
1	<b>PROJECTE</b>	614		
2	<b>1. Avantprojecte</b>	260		
3	1.1. Estudi d'Estat de l'Art	104		Antecedents
4	1.2. Viabilitat Tècnica	32	3	Definició solució
5	1.3. Viabilitat Mediambiental	12	3	Definició solució
6	1.4. Viabilitat Econòmica	20	3	Definició solució
7	1.5. Planificació	22	4;5;6	Definició solució
8	1.6. Pressupost	20	7	Definició solució
9	1.7. Redacció Documentació	50	8	Documentació
10	<b>2. Projecte de Detall</b>	354		
11	2.1. Revisió normativa	10	9	Antecedents
12	2.2. Llistat elements del sistema	127		
13	2.2.1. CE i sistema	30	11	Disseny
14	2.2.2. Tanc H2 i sistema	15	11	Disseny
15	2.2.3. FC i sistema	15	11	Disseny
16	2.2.4. Electrònica de potència	20	13;14;15	Disseny
17	2.2.5. Monitorització i comunicacions	27	16	Disseny
18	2.2.6. Interconnexió	20	16;17	Disseny
19	2.3. Redacció Documentació	20	16	Documentació
20	2.4. Dimensionat instal·lació	112		
21	2.4.1. Estimació consum habitatge	30	18;19	Simulació i anàlisi
22	2.4.2. Estimació producció FV	22	21	Simulació i anàlisi
23	2.4.3. Estimació producció H2 CE	20	21	Simulació i anàlisi
24	2.4.4. Estimació capacitat Tanc H2	20	22;23	Simulació i anàlisi
25	2.4.5. Estimació potència FC	20	24	Simulació i anàlisi
26	2.5. Disseny final del sistema	20	25	Simulació i anàlisi
27	2.6. Plànols	5	26	Disseny
28	2.7. Tancament	20	27	Simulació i anàlisi
29	2.8. Redacció documentació	40	25	Documentació
30	2.9. Entrega final	0	28;29	Documentació

Taula 6.2. Desglossament del treball per a realitzar el projecte.

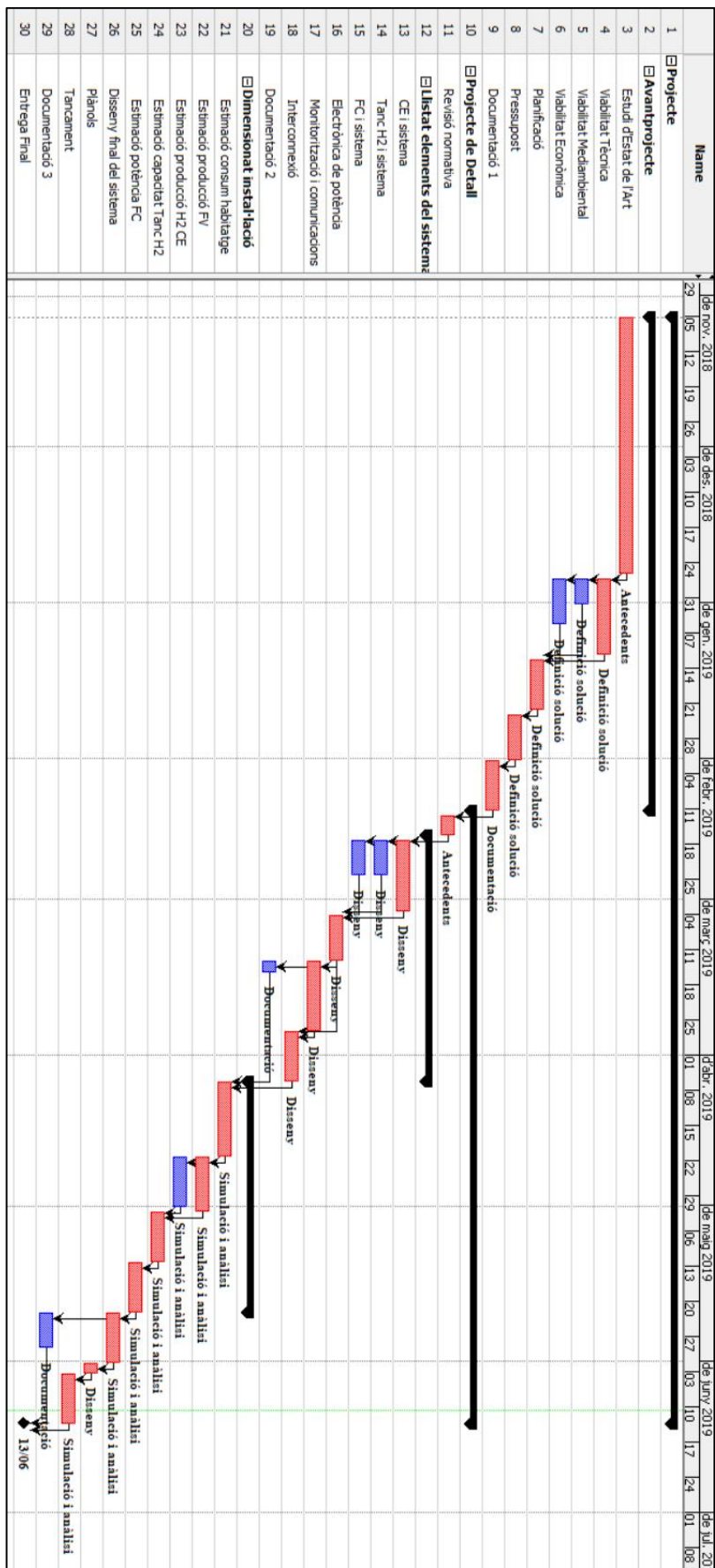


Fig. 6.1. Diagrama de Gantt de la Planificació.

## 6.2. Execució

A continuació es mostra l'estructura del treball realitzat a l'executar el projecte.

Tasques				
Núm.	Tasca	Hores	Predecessores	Recurs
1	<b>Projecte</b>	614		
3	Estudi d'Estat de l'Art	104		Antecedents
4	Viabilitat Tècnica	32	2	Definició solució
5	Viabilitat Mediambiental	12	2	Definició solució
6	Viabilitat Econòmica	20	2	Definició solució
7	Planificació	22	5;4;3	Definició solució
8	Pressupost	20	6	Definició solució
9	Doc AvantProj	50	7	Documentació
11	Info Sist Electròlisi	10	8	Antecedents
12	Info Sist Emmagatzematge	127	8	Antecedents
13	Info Sist Pila	30	8	Antecedents
14	Info Sist Seguretat	15	8	Antecedents
15	Info Sist Normativa	15	8	Antecedents
16	Disseny del sistema	20	9;10;11;12;13	Disseny
17	Elaboració Diagrames	27	14	Disseny
18	Doc Sistema	20	14	Documentació
19	Disseny Procés Càlcul	20	14	Disseny
20	Realització Simulació	112	17	Simulació i anàlisi
21	Anàlisi resultats	30	18	Simulació i anàlisi
22	Dim Components	22	18	Simulació i anàlisi
23	Doc Simulació	20	19;20	Documentació
24	Execució Planif	20	15;18;19	Simulació i anàlisi
25	Estudi econòmic	20	19;22	Simulació i anàlisi
26	Doc Est Ec	20	14	Documentació
27	Tancament	5	23	Simulació i anàlisi
28	Revisió	20	25	Documentació
29	Entrega Final	40	26	Documentació

Taula 6.3. Desglossament del treball per de l'execució del projecte.

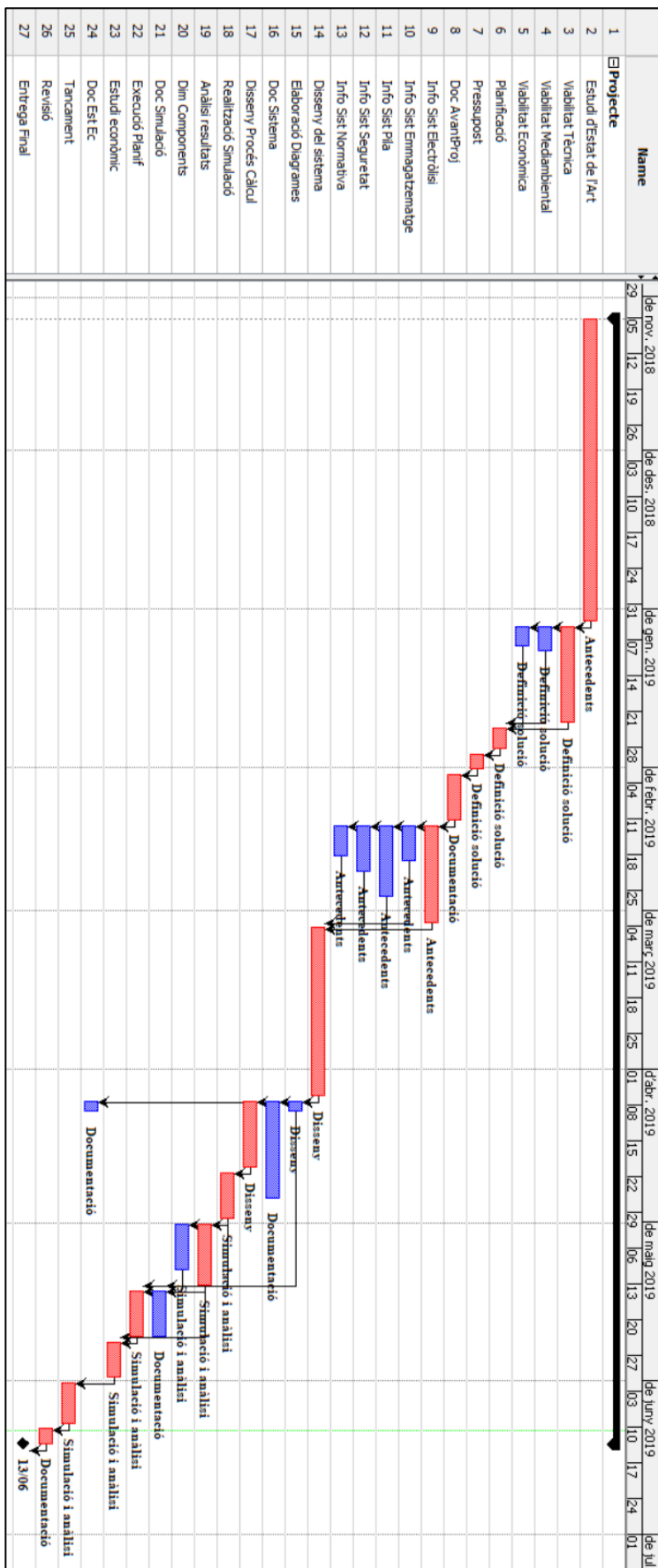


Fig. 6.2. Diagrama de Gantt de l'execució.



### 6.3. Desviacions

Les principals desviacions en la planificació es deuen a que s'ha requerit molt més temps per a la cerca, lectura i anàlisi d'informació per al disseny dels sistemes que l'esperat inicialment. Això s'ha degut a que durant la fase inicial encara no s'havia definit l'objectiu del projecte perquè es va dedicar a la cerca d'informació sobre l'estat de l'art de la tecnologia d'hidrogen.

Durant el desenvolupament del projecte s'han anat modificant les necessitats d'informació per a poder realitzar el disseny dels subsistemes d'electròlisi i la pila de combustible, doncs es tracta d'una tecnologia complexa que requereix coneixements de diferents àrees. Aquestes necessitats detectades durant la realització han canviat l'estructura de la planificació tal com es pot veure en els diagrames de Gantt i en l'estructura del treball.

Al dedicar més temps a la cerca d'informació s'ha reduït el temps dedicat a altres tasques. Tampoc s'han realitzat plànols del projecte degut a que ja s'han inclòs els diagrames de blocs en el capítol de solució tècnica.

A la següent taula es poden veure les diferències en les hores dedicades a diferents tasques en la planificació i en l'execució del projecte.

Codi	Descripció	Planificació	Execució
1,1	Hores de projectista destinades a la cerca d'antecedents i informació prèvia	114	240
1,2	Hores de projectista destinades a la definició i plantejament de la solució	106	80
1,3	Hores de projectista destinades al desenvolupament i disseny del sistema	132	72
1,4	Hores de projectista destinades a la simulació i anàlisi dels resultats	152	114
1,5	Hores de projectista destinades a l'elaboració escrita i edició dels documents del projecte	110	124
<b>TOTALS</b>		614	630

Taula 6.4. Hores totals.de planificació i execució.



## 7. Impacte mediambiental

La viabilitat mediambiental és l'objectiu principal d'aquest projecte, es busca l'estabilització d'una font d'energia renovable a partir d'una tecnologia sense emissions de CO<sub>2</sub> com és la pila de combustible d'hidrogen.

### 7.1. Emissions evitades

En aquest capítol es calculen les emissions evitades pel consum d'energia renovable a partir de les següents dades:

- Emissions electricitat de la xarxa 0,201 kgCO<sub>2</sub>/kWh, equivalent a (Font: *Red Eléctrica de España*, 2019). S'aplicarà a per a l'energia autoconsumida per la fotovoltaica i per a l'energia elèctrica produïda per la pila de combustible.
- Emissions gas natural 0,204 kgCO<sub>2</sub>/kWh (Font: *Fundación para la Eficiencia Energética y el Medio Ambiente*).S'aplicarà per a l'energia tèrmica produïda per la pila de combustible.

A la següent taula es poden veure les emissions anuals evitades en kg de CO<sub>2</sub>:

Font	Quantitat anual [kWh]	Relació [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	Emissions evitades anuals [kg CO <sub>2</sub> ]
Energia solar autoconsumida	6312,39	0,201	1268,79
Energia elèctrica pila de combustible	662,16	0,201	133,09
Energia tèrmica pila de combustible	529,73	0,204	108,06
<b>TOTAL ANUAL</b>			<b>1509,95</b>

Taula 7.1. Taula amb valors d'emissions de CO<sub>2</sub> evitades a l'any.

## 7.2. Consum d'aigua

A continuació es calcula la quantitat d'aigua necessària per a la producció dels 40,75 kg d'H<sub>2</sub> produïts a l'any:

$$40,75 \text{ kg } H_2 \cdot \frac{1 \text{ mol } H_2}{2 \text{ g } H_2} \cdot \frac{1 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } H_2} \cdot \frac{18 \text{ g } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} = 733,50 \text{ kg } H_2O \quad (7.1)$$

Com que per a la realització correcta de la reacció d'electròlisi es necessita com a mínim un ràtio estequiomètric de 2, cal duplicar la quantitat d'aigua, resultant en 1.467 kg aigua/any. Segons l'*Instituto Nacional de Estadística* l'any 2016 es van consumir 136 litres per persona i dia als habitatges [26], per tant el consum anual d'aigua equival al consum d'onze dies d'una persona. Tot i tenir en compte aquest consum, cal afegir que la major part de l'aigua es recicla en el propi sistema, i que el consum real s'estima que serà molt menor.

## 8. Conclusions

En aquest projecte s'ha realitzat un estudi teòric i de l'estat de l'art de l'electròlisi, l'emmagatzematge d' $H_2$  i el seu ús en una pila de combustible. Gràcies a aquest estudi s'ha pogut fer el disseny bàsic d'un sistema (que implica aquestes tres tecnologies) combinat amb una instal·lació fotovoltaica per a emmagatzemar-ne els excedents. També s'ha realitzat simulació anual amb resolució horària a partir de la producció d'una instal·lació fotovoltaica, l'estimació del consum d'un habitatge i els valors d'eficiència dels diferents subsistemes segons l'estat de l'art. Les dades extretes de la simulació han permès realitzar un estudi energètic i econòmic.

El context del projecte és l'obertura d'un nou camp d'estudi dins de l'àrea de sostenibilitat del grup de recerca FI4 de la Escola Superior Politècnica del Tecnocampus. El nou camp d'estudi és l'energia d'hidrogen com a vector energètic no contaminant.

Al llarg de la realització del projecte s'han pogut identificar problemes en la viabilitat de l'acumulació d'energia i en la viabilitat econòmica. La falta de viabilitat energètica es deu a la incapacitat del sistema d'acumular prou energia per a períodes de més d'un dia fora de les vacances d'estiu a causa de la tipologia de la corba de càrrega de l'habitatge. La falta de viabilitat econòmica es deu a l'alt preu dels sistemes d'electròlisi i de pila de combustible i a la complexitat de la planta necessària per a la correcta operació d'aquest, que obliga a fer una inversió molt alta per generar quantitats d'energia poc significatives en l'escala d'un habitatge.

Un altre impediment en la viabilitat és la falta de marc legislatiu tant a l'estat espanyol com a la Unió Europea en relació a les tecnologies d'electròlisi i de piles de combustible. Aquesta falta de marc legal deixa l'electròlisi classificada com a activitat industrial de producció de productes químics, fet que causa que no es pugui dur a terme en un habitatge i que posa molta càrrega administrativa als equips de desenvolupament de projectes innovadors en la matèria.

Durant la realització del projecte s'han adquirit coneixements d'electroquímica, termodinàmica i sistemes d'energia, també s'han pogut aplicar coneixements i metodologies apreses durant el grau en enginyeria.

Davant dels problemes de viabilitat analitzats es poden realitzar, com a línies de futur, estudis d'aplicacions en ubicacions alternatives, com en plantes industrials, edificis públics o camps eòlics o fotovoltaics de gran potència. També es pot realitzar un estudi de les emissions produïdes per a la fabricació dels components del sistema.

Tal com s'exposa en l'apartat 1.5, Context en les línies de recerca del Tecnocampus, un sistema d'acumulació d'energia renovable mitjançant hidrogen implica diverses àrees de coneixement, de les quals la majoria estan presents a l'Escola Superior Politècnica del Tecnocampus. Algunes d'aquestes àrees de coneixement, en les quals es podrien realitzar projectes relacionats amb energia d'hidrogen son: les simulacions computacionals de fluids, l'electrònica de potència, l'enginyeria tèrmica, el control, la instrumentació i la sostenibilitat.

## 9. Referències

- [1] V. Subramani, A. Basile i T. N. Vezirôglu, *Compendium of Hydrogen Energy*. Volume 1: Hydrogen Production, Cambridge: Woodland Publishing, Elsevier, 2015.
- [2] «Asociación Española del Hidrógeno,» aeH2, [En línia]. Available: [http://www.aeh2.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=41&lang=en](http://www.aeh2.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=41&lang=en). [Últim accés: Gener 2019].
- [3] A. Godula-Jopek, «Introduction,» de *Hydrogen Production by Electrolysis*, Weinheim, Wiley, 2015, pp. 1-29.
- [4] R. L. Bussy, *Hydrogen and Fuel Cells. A Comprehensive Guide.*, Tulsa: PennWell, 2005.
- [5] «International Association for Hydrogen Safety,» [En línia]. Available: <https://www.hysafe.info>. [Últim accés: 1 Febrer 2019].
- [6] R. Wurster, *Compendium for Hydrogen Energy Volume 4: Hydrogen safety: An overview*, Vol. 1 de *Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy*, Sawston, Cambridge: Elsevier, 2016, pp. 194-212.
- [7] P. Atkins i J. de Paula, «The temperature-dependence of reaction enthalpies,» de *Atkins' Physical Chemistry*, New York, W. H. Freeman and Company, 2006, p. 56.
- [8] A. Godula-Jopek, «Fundamentals of Water Electrolysis,» de *Hydrogen Production by Electrolysis*, Weinheim, Wiley, 2015, pp. 33-62.

- [9] R. O'Hayre, S.-W. Chan, W. Colella i F. B. Prinz, «Fuel Cell Principles. Thermodynamics.,» de *Fuel Cell Fundamentals*, Hoboken, Wiley, 2016, pp. 25-76.
- [10] D. V. Schroeder, «Free Energy and Chemical Thermodynamics,» de *An Introduction to Thermal Physics*, Addison Wesley Longman, 1999, pp. 149-160.
- [11] A. Godula-Jopek, «Hydrogen Storage Options Including Constraints and Challenges,» de *Hydrogen Production by Electrolysis*, Weinheim, Wiley, 2015, pp. 273-310.
- [12] R. O'Hayre, S.-W. Chan, W. Colella i F. B. Prinz, «Fuel Cell Principles. Introduction.,» de *Fuel Cell Fundamentals*, Hoboken, Wiley, 2016, pp. 3-24.
- [13] R. O'Hayre, S.-W. Chan, W. Colella i F. B. Prinz, «Overview of Fuel Cell Types,» de *Fuel Cell Fundamentals*, Hoboken, Wiley, 2016, pp. 273-302.
- [14] A. Bernad i M. Zarzuela, «Informe de Recomendaciones Legislativas para el Sector del Hidrógeno en España,» 2016.
- [15] D. Bessarabov, H. Wang, H. Li i N. Zhao, *PEM Electrolysis for Hydrogen Production. Principles and Applications.*, Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [16] D. Pritchard, M. Royle i M. Willoughby, «Installation permitting guidance for Hydrogen and Fuel Cell Stationary Applications - UK version,» Health and Safety Laboratory, 2009. [En línia]. Available: <http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr715.htm>. [Últim accés: 10 05 2019].
- [17] FCH 2 JU, «FUEL CELLS and HYDROGEN 2 JOINT UNDERTAKING. Addendum to the Multi-Annual Work Plan 2014-2020,» 2018. [En línia]. Available: [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/MAWP%20final%20version\\_endorsed%20GB%2015062018%20%28ID%203712421%29.pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/MAWP%20final%20version_endorsed%20GB%2015062018%20%28ID%203712421%29.pdf). [Últim accés: 29 04 2019].



- [18] Z. Qi, Proton Exchange Membrane Fuel Cells, Hubei: CRC Press, 2014.
- [19] F. Barbir, PEM Fuel Cells. Theory and Practice, London: Elsevier, 2013.
- [20] C. Spiegel, Designing and Building Fuel Cells, McGrawHill, 2007.
- [21] M. Ball, A. Basile i N. Veziroğlu, Compendium of Hydrogen Energy Volume 4: Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy, Kidlington: Elsevier, 2016.
- [22] «PV Software PV\*SOL premium,» Valentin Software, [En línia]. Available: <https://www.valentin-software.com/en/products/photovoltaics/57/pvsol-premium>. [Últim accés: 14 02 2019].
- [23] IDAE, «PROYECTO SECH-SPAHOUSEC Análisis del consumo energético del sector residencial en España,» 2011. [En línia]. Available: [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_Informe\\_SPAHOUSEC\\_AC\\_C\\_f68291a3.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Informe_SPAHOUSEC_AC_C_f68291a3.pdf). [Últim accés: 10 05 2019].
- [24] N. Mohan, Power Electronics. A First Course, Danvers: Wiley, 2012.
- [25] BYD, «BYD B-Box Battery Storage Datasheet,» [En línia]. Available: <https://autosolar.es/pdf/B-Box-Low-Voltage-Specification.pdf>. [Últim accés: 30 05 2019].
- [26] Instituto Nacional de Estadística, «Estadísticas sobre el Suministro y Saneamiento del Agua - Año 2016,» 2016. [En línia]. Available: [https://www.ine.es/prensa/essa\\_2016.pdf](https://www.ine.es/prensa/essa_2016.pdf). [Últim accés: 04 06 2019].