

# L'Hidrogen com a Vector Energètic



Fabricio Berk Jimenez

2º Bat C

Institut Baix Camp

Tutor: Jordi Guarque Sugrañes

Data: dimarts, 11 de gener del 2022



## **Agraïments**

M'agradaria donar les gràcies a algunes persones que m'han ajudat molt a aconseguir fer aquest Treball. Primer de tot al meu tutor Jordi Guarque, que m'ha acompanyat al llarg de tota l'elaboració del projecte i que m'ha inspirat en molts casos. També vull donar les gràcies a la meva família perquè m'ha donat suport en tot moment i m'ha ajuda a obtenir el material necessari. Igualment vull agrair al Dr. Jordi Cartanyà que hagi dedicat una estona per aportar-me la seva experiència. I per acabar vull donar les gràcies als meus amics que m'han sigut de molta ajuda.

## RESUM

Aquest treball busca que el lector pugui introduir-se en què són les piles de combustible i en com funcionen de forma genèrica i experimental.

El document està dividit en dues parts principals, una part teòrica i una part pràctica. A la part teòrica es comença explicant que és l'hidrogen, la seva importància a l'univers, les seves aplicacions i s'explica que és l'hidrogen verd. Després es presenten diferents mètodes d'obtenció d'hidrogen i les seves repercussions mediambientals així com les seves característiques.

Un cop dit això, es presenten els diferents models de piles de combustible, s'explica el funcionament i les característiques de cadascun, les seves aplicacions, els seus avantatges i inconvenients a més d'altres dades comparatives.

Per acabar amb la part teòrica es raonen les conseqüències de l'ús de les piles de combustible en l'aspecte mediambiental. I amb l'ajuda d'un expert en la matèria, es fa una anàlisi de quines aplicacions tenen avui dia, quines són les que s'estan implementant i quines seran en un futur les possibles utilitats d'aquestes.

A la part més experimental es realitzen diversos experiments, el primer l'electròlisi de l'aigua amb NaOH com a electròlit i amb elèctrodes de carboni, d'aquest procés s'analitzen tots els conceptes termodinàmics que hi ha al darrere i es calcula el voltatge necessari per produir la reacció així com el seu rendiment.

També es farà ús d'una cèl·lula de combustible d'intercanvi protònic (PEMFC) per produir l'electròlisi de forma totalment renovable i fer funcionar un cotxet de joguina. D'aquesta part es realitzaran els càlculs per obtenir l'eficiència de la pila que tinc. I per acabar, es fan algunes proves amb la pila PEM per veure que pot fer funcionar.

## **ABSTRACT**

This paper seeks to introduce the reader to what fuel cells are and how they work in a generic and experimental way, as well as other related concepts.

This written report is divided into two main parts, a theoretical part and a practical part. The theoretical part begins by explaining what hydrogen is, its importance in the universe, its applications and explains what green hydrogen is. Moreover, different methods of obtaining hydrogen and their environmental consequences are presented, as well as their characteristics.

Furthermore, different models of fuel cells are described, the operation and characteristics of each one are explained, their applications, their advantages and disadvantages as well as other comparative data.

To conclude with the theoretical part, the consequences of the use of fuel cells in the environment are discussed. And with the help of an expert in this field, an analysis is made of which applications they have today, which ones are being implemented and which will be in the future the possible uses of fuel cells.

In the most experimental part, several experiments are performed, the first is the electrolysis of water with NaOH as an electrolyte and with carbon electrodes, this process analyses all the thermodynamic concepts behind it, and calculates the voltage required to produce the reaction as well as the yield of the reaction.

A proton exchange fuel cell (PEMFC) will also be used to produce electrolysis in a fully renewable way and to operate a toy car. From this part, the calculations will be done to get the efficiency of the battery I have. And finally, we do some testing with the PEM battery to see which gadgets can work.

# ÍNDEX

1. Introducció.....	6
2. L'hidrogen.....	7
2.1- La importància de l'hidrogen a l'univers.....	7
2.2- Característiques de l'hidrogen.....	7
2.3- Àmbits d'aplicació de l'hidrogen .....	9
2.4- l'Hidrogen Verd.....	9
3. Procediments per a l'obtenció d'hidrogen.....	11
3.1- Electrolísis de l'aigua.....	11
3.2- Mitjançant tecnologies termoquímiques.....	14
4. Piles de combustible.....	16
4.1- Definició.....	16
4.2- Parts fonamentals d'una pila de combustible.....	16
4.3- Funcionament d'una pila de combustible.....	17
5. Tipus de piles de combustible i aplicacions .....	19
6. Conseqüències mediambientals de les piles de combustible.....	26
6.1- Efectes mediambientals (comparat amb altres combustibles).....	26
6.2- La vall de l'hidrogen de Catalunya.....	26
7. Part pràctica del TdR.....	28
7.1- Pràctica 1: l'electrolísis de l'aigua.....	28
7.2- Pràctica 2: Cotxet amb pila de combustible.....	38
7.3- Pràctica 3: Juguem amb la pila de combustible.....	48
8. Perspectives de futur i Conclusions.....	50
9. Referències.....	52

# INTRODUCCIÓ

Sempre he cregut que l'energia és el que mou l'univers i per això sempre m'ha interessat aquest món; que és, com l'aconseguim... i sobretot les fonts renovables que podem utilitzar per viure de forma sostenible. I en el context climàtic tan greu en el qual ens trobem em va semblar interessant buscar un tema relacionat amb les energies renovables i que fos nou per mi. Va ser aquí quan el meu tutor Jordi Guarque em va presentar un tema del qual havia sentit a parlar, les piles d'hidrogen.

Llavors vaig començar a llegir al respecte el que eren i, em va sorprendre veure que era una tecnologia amb moltíssimes aplicacions possibles i que a poc a poc s'estava implementant més al nostre entorn. Malgrat això, molta gent del meu entorn no n'havia sentit a parlar d'aquesta tecnologia i, per això vaig escollir aquest tema per al meu TdR.

Amb aquest treball de recerca tractaré d'explicar què són les piles de combustible, com funcionen, quina és la importància de l'hidrogen i quin és el paper de les fonts d'energies renovables per aconseguir una sostenibilitat climàtica.

A més d'això vull raonar si són o no unes bones candidates per lluitar contra el canvi climàtic i afavorir a la descarbonització.

## 2. L'HIDROGEN

Per entendre com funcionen les piles de combustible és necessari saber una mica sobre el seu combustible, l'hidrogen. I és per això que aquest primer apartat el dedicaré a parlar sobre l'hidrogen

### 2.1 La importància de l'hidrogen a l'univers

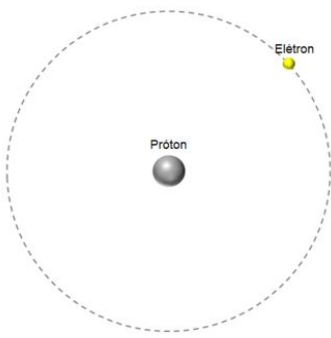
L'hidrogen és l'element més simple que hi ha a l'univers, és per això que l'àtom d'hidrogen no s'acostuma a veure sol sinó que es combina amb altres elements o amb si mateix per formar estructures moleculars.

A la Terra es pot trobar l'àtom d'H en molts llocs, ara bé, per ser útil com a combustible el necessitem en forma de gas. La molècula d'hidrogen forma part de la majoria dels compostos orgànics així com dels hidrocarburs que s'utilitzen com a combustibles fòssils. I no és un element escaig, ja que comporta el 70% de matèria visible de l'univers.

Per altra banda, les estrelles estan formades per hidrogen en estat de plasma (encara que mitjançant reaccions nuclears doni lloc a heli i altres elements) i aquestes són les generadores de nous elements el que dona lloc a la cèlebre frase de Carl Sagan "*we are made of stardust*" (estem fets de pols d'estrelles).

### 2.2 Característiques de l'hidrogen

Aquí només faré menció a les característiques que per al meu treball són rellevants.

Nom	Hidrogen
Símbol	H
Estructura	 El diagrama mostra un àtom d'hidrogen amb un nucli central que conté un protó, etiquetat com "Protón". Al voltant del nucli hi ha una òrbita circular representada per una línia puntejada, on es troba un electró, etiquetat com "Electron".
estat en condicions normal	gas
Estat d'oxidació	+1,-1
Temperatura d'ebullició	-252,7 °C

poder calorífic superior	141,86 MJ/Kg
poder calorífic inferior	119,93 MJ/Kg

L'àtom H està format per un nucli amb un protó i un electró que l'òrbita. Aquesta estructura fa que sigui un element molt reactiu i, que el troben sempre combinats amb altres elements.

En condicions normals es troba en estat gasós i com es veu al diagrama de fases de sota, a una atmosfera l'hidrogen es manté en estat líquid fins a gairebé el zero absolut. És un element inodor, incolor i insípid, no resulta tòxic, però si és molt inflamable i té una gran difusivitat.

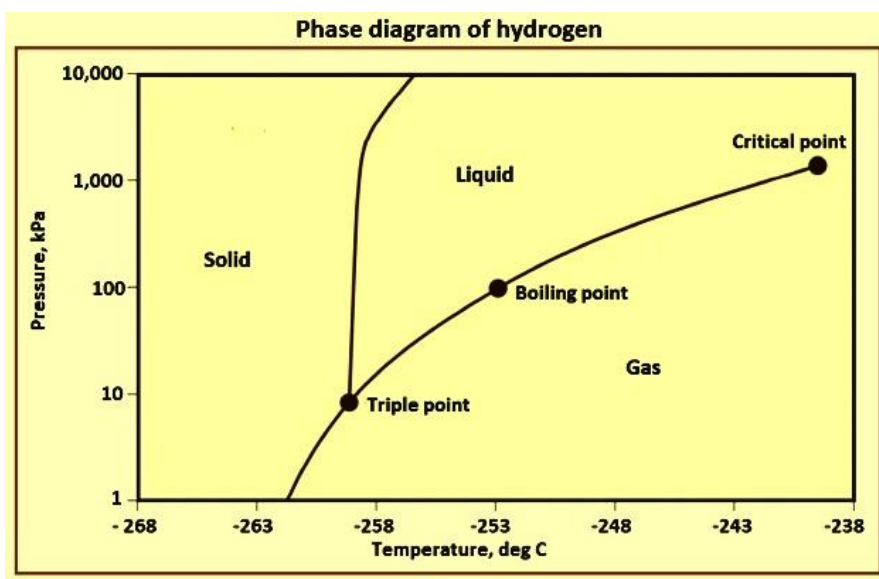


Diagrama de fases de l'hidrogen

Font: [www.ispatguru.com](http://www.ispatguru.com)

Per altra banda, és l'element més lleuger de l'univers i el seu poder calorífic és dels més alts, per comparar-ho podem veure a la següent taula els continguts energètics d'altres combustibles.

Combustible	Poder calorífic superior MJ/Kg	Poder calorífic inferior MJ/Kg
Hidrogen	141,9	120
Gasolina	47,5	44,5
Diesel	44,8	42,5
Metà	20	18

No obstant en certes aplicacions la seva baixa densitat no resulta eficaç, ja que la quantitat d'energia per volum no és tan alta com la d'altres combustibles i per això s'emmagatzema a altes pressions que arriben als 700 bars.

### **2.3- Àmbits d'aplicació de l'hidrogen**

L'hidrogen ha sigut utilitzat a l'àmbit industrial des de fa molt de temps i el seu ús no és res nou. Algunes aplicacions interessant que he trobat han sigut les següents:

- per la producció de l'amoníac
- per sintetitzar alcohols i fibres sintètiques
- per la fabricació del vidre
- per la fabricació d'acers
- per elevar globus meteorològics
- per elaborar cosmètics i fertilitzants
- per l'elaboració d'aigua oxigenada (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)
- per refrigerar motors i generadors
- té moltes aplicacions en processos de síntesis de molts productes de la indústria petroquímica i en processos catalítics
- per donar energia elèctrica mitjançant una pila de combustible

Algunes d'aquestes aplicacions aprofiten les característiques més físiques com en el cas del globus meteorològic, que fan ús de la baixa densitat. Altres fan ús del seu baix punt de fusió com en el cas dels refrigerants i altres de les propietats químiques com en la producció d'amoníac (NH<sub>3</sub>). En aquest treball em centraré en l'ús de l'hidrogen com a vector energètic i més endavant parlaré de les piles de combustible.

### **2.4 L'hidrogen Verd**

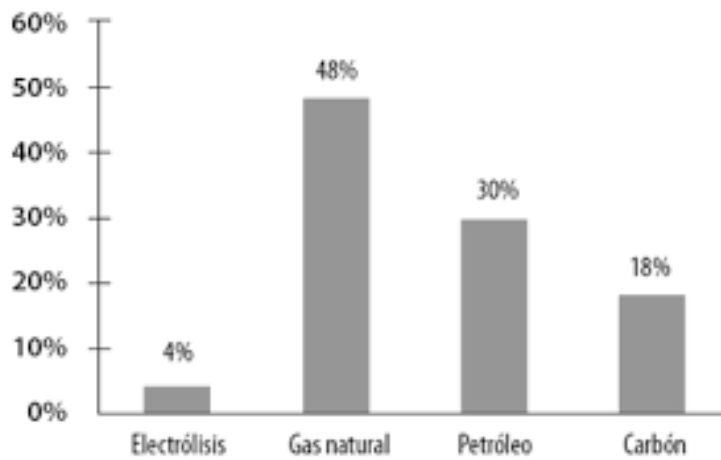
L'hidrogen verd o hidrogen renovable no és un hidrogen diferent del mencionat anteriorment, les seves característiques i utilitats són les mateixes, l'única diferència són les seves repercussions mediambientals. Perquè l'hidrogen es pugui considerar verd ha de ser produït amb l'electròlisi de l'aigua i l'energia utilitzada ha de ser d'origen renovable, sense cap classe d'emissió de CO<sub>2</sub>, al contrari de l'hidrogen gris, que sempre produeix emissions de gasos d'efecte hivernacle.

#### **Importància**

La importància que té l'hidrogen verd és molt clara. Serveix per afavorir a la descarbonització de molts sectors industrials i també sectors urbans com les ciutats.

Gràcies a les característiques de l'hidrogen, podem obtenir-lo de moltes fonts diferents tanmateix, avui dia l'hidrogen es genera majoritàriament a les indústries com a reactiu per a molts processos industrials. I per desgràcia, com la forma més barata d'aconseguir-ho és a través d'hidrocarburs, són aquests els que s'empren

més. Tot i que aquests processos emeten enormes quantitats de gasos contaminant inclòs el CO<sub>2</sub>, avui dia l'hidrogen mundial s'aconsegueix en la següent proporció.



Gràfica de les fonts d'obtenció de l'hidrogen al món

Font: [www.uvadoc.uva.es](http://www.uvadoc.uva.es)

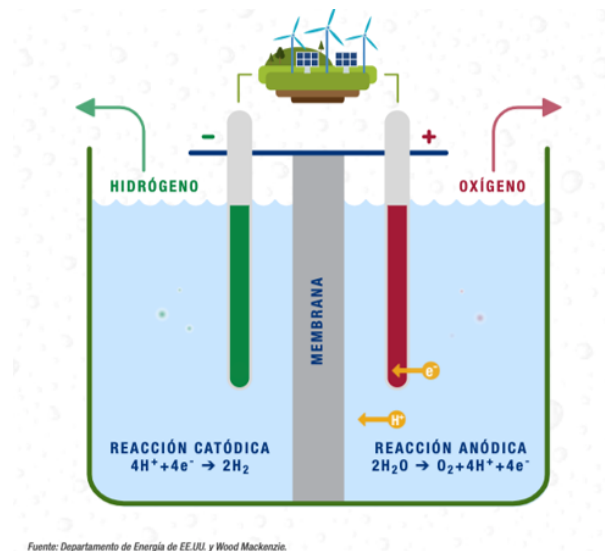
I com ja molts sabreu, els GEH (gasos d'efecte hivernacle) són els causants principals de l'efecte hivernacle i en conseqüència de l'escalfament global del nostre planeta. Aquest problema és el resultat de dècades d'ús d'energies no renovables, de l'ús de combustible fòssil i, si volem guanyar aquesta lluita és, i serà necessari l'ús de l'hidrogen verd.

### 3. PROCEDIMENTS PER A L'OBTENCIÓ D'HIDROGEN

L'obtenció de l'hidrogen és una part molt important si volem fer ús de cèl·lules de combustible. L'hidrogen és l'element més abundant de l'univers i es troba combinat amb nombroses substàncies. Per això, s'han elaborat diversos mètodes per aconseguir-lo de diferents fonts. Jo explicaré breument dos mètodes que s'utilitzen actualment i em centraré en el primer perquè és el mètode més net de produir hidrogen.

#### 3.1- Electròlisis de l'aigua

L'electròlisis de l'aigua és un procés electroquímic no espontani que serveix per separar les molècules de l'aigua i poder obtenir hidrogen i oxigen en forma de gas. Aquest procés requereix una aportació d'energia perquè com he dit l'aigua no es disgrega en H<sub>2</sub> i O<sub>2</sub> de forma natural (en condicions normals).



Representació de l'electròlisi de l'aigua amb energia renovable

FONT: [www.vigaflow.com](http://www.vigaflow.com)

En fer l'aportació d'energia necessària per separar els àtoms de l'aigua les reaccions que es donen als elèctrodes són les següents:

A l'anode es produeix la reacció d'oxidació:  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

Al càtode la reacció de reducció:  $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$  (gas)

I la reacció general que tenim és:  $\text{H}_2\text{O} + \text{energia elèctrica} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$

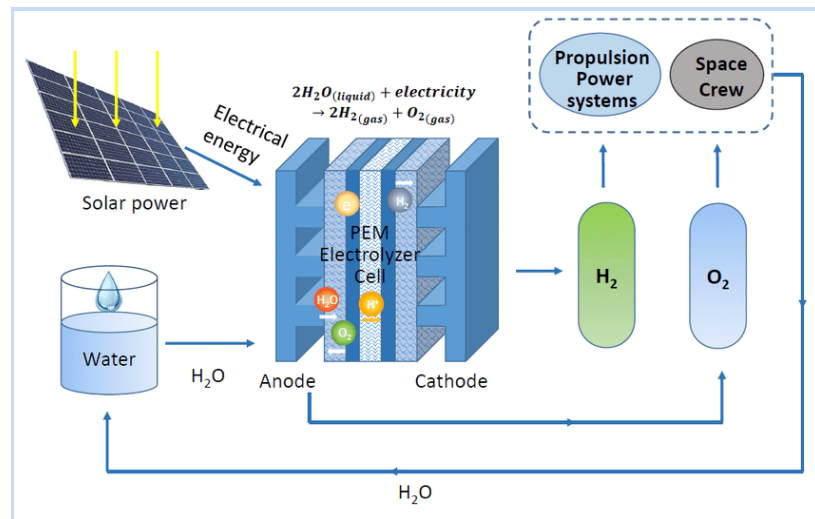
Hi ha tres tecnologies en electrolitzadors que ara explicaré: Electrolitzadors alcalins, electrolitzadors de membrana polimèrica i electrolitzadors d'òxid sòlid o d'alta temperatura. Els dos primers ja són utilitzats comercialment i l'últim es troba en fase d'investigació.

## Electrolitzador alcalí

L'electrolitzador alcalí és el més comú i conegut, està disponible en diferents escales; petita (< 250 kW), mitjana (0,25-100 MW) i gran (> 100 MW). En tots els casos s'utilitza una solució alcalina com a electròlit (KOH) i la transferència iònica es fa amb anions  $\text{OH}^-$ . El gas obtingut arriba a tindre una concentració de  $\text{H}_2$  del 99,8%. Un factor destacable és que no requereix catalitzadors d'alta puresa, funciona bé amb catalitzadors de níquel, acer o ferro.

## Electrolitzador de membrana polimèrica

A diferència del sistema alcalí aquest fa servir un electròlit sòlid que opera en un medi àcid, per això la construcció d'aquests electrolitzadors és més senzilla i la seva reacció és més ràpida perquè, no té la resistència intrínseca de l'electròlit líquid. A més, li confereix més lleugeresa al conjunt i el fa més petit.



Esquema d'una pila PEM i el seu funcionament

FONT: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

## Electrolitzadors d'òxid sòlid

Els electrolitzadors d'òxid sòlid, es troben en fase d'investigació, i es basa en conductors iònics els quals generen anions  $\text{O}^{2-}$  a temperatures properes als  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  i cations  $\text{H}^+$  als  $600\text{ }^\circ\text{C}$  aproximadament. Els ions d'oxigen es condueixen amb un electròlit sòlid.

En aquest cas són necessaris materials resistents a la corrosió i estables a altes temperatures. L'avantatge principal és que no requereix aigua d'alta puresa.

## Graella comparativa

A la graella següent estan recopilades les característiques més importants dels diferents electrolitzadors

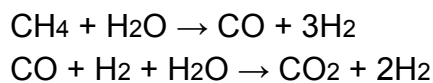
Tipus	E. Alcalí	Membrana polimèrica	Òxid sòlid
Ànode	Ni, Fe, aliatges $4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	$\text{TiO}_2/\text{RuO}_2-\text{IrO}_2$ $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	Ceràmica (Mn, Cr) Ni $2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{e}^-$
Càtode	Acers +Ni $4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2 + 4\text{OH}^-$	Carbó +PtNi/PtCo $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$	Zr, Ni $2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2 + 2\text{O}^{2-}$
Electròlit	KOH 30%	Membrana d'intercanvi protònic	Zirconi
Ió de transport	$\text{OH}^-$	$\text{H}^+$	$\text{O}^{2-}$ , a 1000 °c $\text{H}^+$ , a 600 °c
Rendiment i temps de vida	75-90% /15-20 anys	75-90% / 18 anys	75-90% / en investigació
Consum KWh/Nm <sup>3</sup> (H <sub>2</sub> )	4-5 KWh/Nm <sup>3</sup> (H <sub>2</sub> )	6 KWh/Nm <sup>3</sup> (H <sub>2</sub> )	3-3,5 KWh/Nm <sup>3</sup> (H <sub>2</sub> )
Temperatura	50 - 100 °c	80 - 100 °c	800 - 1000 °c
Pressió	3 - 30 bars	1 - 70 bars	En investigació
Reacció	lenta (10-10 <sup>3</sup> s)	Ràpid (1 s)	En investigació
Cost relatiu del H <sub>2</sub>	Moderat (depèn de l'escala)	Molt alt	En investigació
Avantatges	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tecnologia provada</li> <li>- Existent</li> <li>- Alta eficiència</li> <li>- Baix cost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No té parts mòbils</li> <li>- No té líquids corrosius</li> <li>- Dissenys variables</li> <li>- Sortida de gasos a alta pressió</li> <li>- Tecnologia provada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No té parts mòbils</li> <li>- No té líquids corrosius</li> <li>- Utilitza energia tèrmica per reduir el consum elèctric</li> <li>- No requereix aigua pura</li> <li>- Sortida de gasos a alta pressió</li> </ul>
Inconvenients	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'electròlit líquid limita la resposta i incrementa el manteniment</li> <li>- Requereix un sistema de purificació</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alt cost de la membrana polimèrica</li> <li>- Alt cost dels catalitzadors</li> <li>- Alt cost de fabricació</li> <li>- Requereix aigua molt pura</li> <li>- No disponible a gran escala (MW)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temps de vida limitat per la corrosió i la temperatura</li> <li>- Hi ha cicles tèrmics que produeixen parades.</li> <li>- Riscos d'operació</li> <li>- Limitades aplicacions</li> </ul>

### 3.2- Mitjançant tecnologies termoquímiques

Avui en dia els mètodes de producció d'hidrogen són diversos i depenen de la font d'on s'obtingui, pot provenir d'hidrocarburs, carbohidrats o aigua. Els processos per aconseguir H<sub>2</sub> a partir de la dissociació de l'aigua mitjançant cicles termoquímics són els següents.

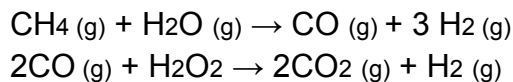
#### Mètode de Bosh

És un mètode que permet la dissociació de l'aigua a elevades temperatures (>1200 K) es fa reaccionar el vapor d'aigua catalíticament amb gas metà (CH<sub>4</sub>) per obtenir H<sub>2</sub>. Les reaccions termoquímiques són les següents:



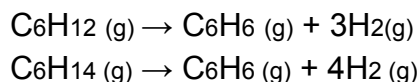
#### Reformació de gas natural

És utilitzat en producció massiva de H<sub>2</sub> a la indústria química, petroquímica, d'olis, lubricants i fertilitzants entre altres. Consisteix en dues etapes principals: la reacció del metà amb vapor d'aigua a alta temperatura (>1000 K) que produeix CO i hidrogen (3H<sub>2</sub>). Després el monòxid de carboni entra al segon reactor per reaccionar amb vapor d'aigua oxigenada. Les dues reaccions són:



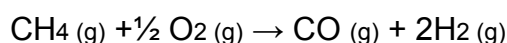
#### Reformació de la gasolina

És un procés que s'utilitza normalment per augmentar el nombre d'octans en gasolines, és un procés de deshidrogenació amb catalitzador (El número d'octà serveix per mesurar la resistència a detonar d'un combustible, com més alt és, més compressible és i té millor rendiment) però també s'obté H<sub>2</sub>. Les reaccions són:



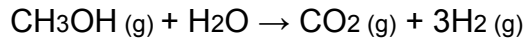
#### Oxidació parcial d'hidrocarburs

S'utilitza a la indústria petroquímica per obtenir òxids orgànics, però també genera hidrogen gas. Un exemple seria amb metà:



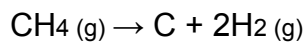
## Dissociació del metanol

El primer és un procés molt simple en el que es fa reaccionar metanol amb vapor d'aigua a 573 K de temperatura per produir hidrogen. La reacció química és:



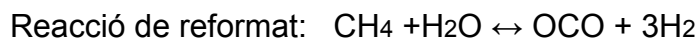
## Piròlisis de contacte directe

Es tracta de la reacció de cracking del metanol, que tot i ser poc utilitzada té l'avantatge que no produeix emissions de  $\text{CO}_2$ , ni òxids de nitrogen. Només s'empra energia tèrmica, s'obté carbó i hidrogen gas que se separen per la seva diferència de densitat.



## A partir d'hidrocarburs

És el procés més important de producció d'hidrogen a escala industrial a partir d'hidrocarburs, principalment gas natural i metà per la seva disponibilitat i el seu baix cost. La reacció endotèrmica que requereix consumeix molta energia i els combustibles no poden tindre sofre perquè pot enverinar els metalls nobles dels catalitzadors del reformador. La reacció de reformat és:



Les quatre fases del reformat del metà amb vapor d'aigua són:

- Procés de pretractament
- Un reactor de reformació
- Un reactor WGS
- Procés de purificació de gas

De forma resumida: Es barregen els hidrocarburs amb vapor d'aigua a altes temperatures produint hidrogen,  $\text{CO}_2$  i  $\text{CO}$ . Després es pot enriquir el resultat amb el procés WGS per obtenir un gas ric en  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2$  i amb menor proporció;  $\text{C}$ , que es pot eliminar amb altres reaccions. Llavors s'aconsegueix una barreja de  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  i una mica de  $\text{CO}$  i  $\text{CH}_4$ .

Finalment, es purifica el que permet uns resultats d'hidrogen amb concentracions del 99,99% que té un valor energètic major al del gas natural del qual s'origina.

## 4. Piles de combustible

### 4.1- Definició

Quan parlem de piles de combustible o cel·les de combustible fem referència a qualsevol dispositiu electroquímic capaç de transformar l'energia química emmagatzemada en un combustible directament en energia elèctrica mitjançant una reacció química.

El principi en què es basa és una reacció electrolítica, l'hidrogen i l'oxigen es combinen per formar aigua i a conseqüència d'aquesta reacció exotèrmica s'aconsegueix energia elèctrica i calor. El que vol dir que és una reacció neta que només té com a residu vapor d'aigua que pot ser alliberat fàcilment a l'atmosfera sense representar cap perill pel medi ambient ni per a les persones.

La principal diferència amb les bateries convencionals és que aquestes són acumuladores d'energia i les piles de combustible són dispositius que teòricament tenen la capacitat de produir energia elèctrica de forma indefinida mentre se subministri combustible de forma constant als elèctrodes.

Tenint aquests conceptes generals clars podem arribar a la conclusió que les piles de combustible poden ser respectuoses amb el medi ambient sempre que l'hidrogen que s'utilitzi sigui verd. A continuació em centraré en altre apartat necessari per entendre el que passa en una pila de combustible.

### 4.2- Parts fonamentals d'una pila de combustible

Les piles de combustible poden variar en alguns aspectes en qüestió de formes, materials i colors depenent del model i la marca, però hi ha una sèrie de parts fonamentals que ha de tenir per dur a terme la seva funció.

Aquestes parts són les següents:

**Elèctrodes:** L'ànode i el càtode són essencials per produir la reacció. A l'elèctrode negatiu (ànode) s'oxida l' $H_2$  formant protons:  $H^+$  i alliberant electrons. A l'elèctrode positiu (càtode), l'oxigen ( $O_2$ ) obtindrà els 2 electrons provinents de l'ànode i junts formaran:  $O_2^-$ . Quan l' $O_2^-$  es combini amb els protons:  $H^+$  obtindrem  $H_2O$ . Les funcions més importants dels elèctrodes porosos en les cel·les de combustible són:

- Proporcionar punts actius en la superfície, on tinguin lloc les semireaccions d'oxidació i reducció.
- Conduir els ions de transport ( $H^+$ ) fora o dintre de la interfase de tres fases un cop s'hagin format.

**Electròlit** (sòlid o líquid): és una substància de caràcter iònic, que en descompondre's en solució permet el pas d'ions (àtoms carregats positivament o

negativament). Cal destacar que hi ha nombrosos tipus electròlits que tenen característiques que els fan més adients per una pila o una altra.

**Plaques Bipolars:** són les encarregades de moltes funcions entre les quals destaquen:

- Proporciona la sèrie de connexions necessàries entre les piles a través de la conducció del corrent elèctric entre una pila i una altra, permeten formar Stacks (apilaments de cel·les de combustible) per adaptar el voltatge de la pila en conjunt.
- Separa les cel·les de combustible adjacents.
- Evacua els residus de forma controlada (aigua).
- Proporciona rigidesa al conjunt i evita fuites de gas.
- I són les responsables de qualsevol transport de gas entre piles adjacents.

**Catalitzador:** Es tracta d'una substància indispensable per a les piles de baixa temperatura, ja que, sense aquest/s material noble les reaccions electroquímiques es produeixen a una velocitat massa lenta per ser rendible la seva utilització.

El catalitzador pot ser d'un material noble com el platí (Pt) o l'or (Au), en aquests casos implica un increment considerable en el preu de la pila de combustible.

No obstant, els estudis realitzats en relació amb aquest problema han ajudat a millorar els dissenys i ara hi ha piles de combustible que poden utilitzar materials no preciosos que funcionen en la catàlisi com; níquel, ferro, cobalt, crom, coure, tungstè, seleni i estany.

### 4.3- Funcionament d'una pila de combustible

Igual que les piles i bateries convencionals les piles de combustible són en realitat la suma de piles individuals, que formen el que s'anomena un stack o un apilament. Això es fa perquè una sola pila de combustible genera al voltant d'un volt en circuit obert aproximadament i si es requereix un voltatge més gran es connecten en sèrie el nombre de piles de combustible necessàries per satisfer la demanda. Aquests apilaments o stacks permeten adaptar la pila de combustible a qualsevol aparell elèctric que ens puguem imaginar.

Les cel·les de combustible es basen en reaccions electroquímiques on l'energia química es transforma en energia elèctrica, sense necessitat d'un procés de combustió com passaria en una central tèrmica. El dispositiu és molt senzill: està format per dos elèctrodes separats per un electròlit sòlid o líquid. L'electròlit com hem mencionat abans, permet el pas de ions positius (cations) i ions negatius (anions) però no d'electrons. En l'elèctrode negatiu té lloc la semireacció d'oxidació del combustible (normalment es tracta d'hidrogen per la seva reactivitat quan s'utilitzen els catalitzadors adequats i, al positiu té lloc la reducció de l'oxigen

Un bon exemple que tractaré serà el d'una pila de combustible polimèrica que es nomena amb les sigles: PEMFC on les reaccions que hi ha són les següents:

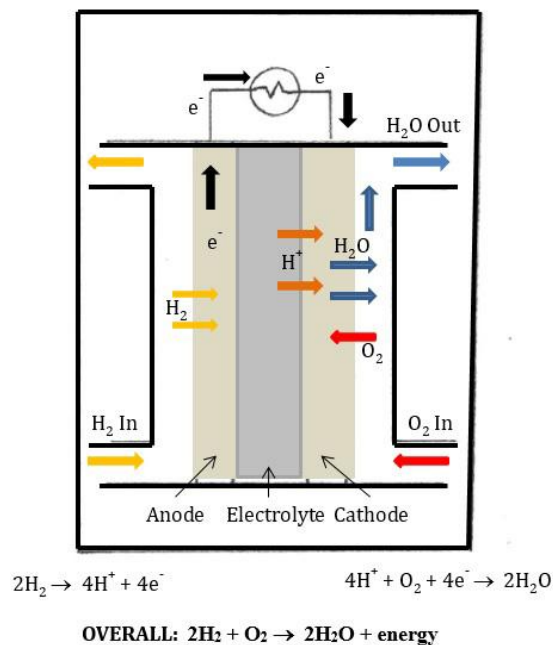
A l'ànode es produeix (semireacció d'oxidació):  $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

L'hidrogen s'oxida; alliberant dos protons i dos electrons.

Al càtode (semireacció de reducció):  $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Ara l'oxigen gas capta els dos protons i els dos electrons alliberats anteriorment i formen una molècula d'aigua

I la reacció general:  $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{electricitat} + \text{calor}$



Esquema del funcionament intern d'una pila PEM.

FONT: [www.jove.com](http://www.jove.com)

La reacció també allibera energia en forma de calor perquè és exotèrmica.

Primer l'oxigen entra pel càtode i es disgrega en ions negatius en presència d'un catalitzador. L'hidrogen, en canvi, s'injecta a l'ànode i amb l'ajuda d'un catalitzador es dissocia en ions positius i electrons. Els ions positius de l'hidrogen viatgen a través de l'electròlit mentre que els electrons ho han de fer mitjançant un circuit extern (com per exemple; un motor elèctric, un portàtil...). D'aquesta manera, els ions positius de l'hidrogen, els seus electrons corresponents i l'oxigen es recombinen al càtode per formar la molècula d'aigua

## 5 -TIPUS DE PILES DE COMBUSTIBLE I APLICACIONS

Tot i que totes les piles de combustible funcionen amb el mateix principi que acabem de veure avui en dia hi ha certes diferències respecte als dissenys, les característiques d'operació, rang de potència, rendiments, electròlits, materials...

És per això que podem trobar piles de combustible que tenen una potència aproximada d'1 W i que funcionen en condicions normals i d'altres que proporcionen potències de 250 kW que treballen a 1273 K de temperatura (1000c°).

La classificació més habitual de les piles de combustible és segons l'electròlit utilitzat, ja que aquest determina les característiques fonamentals de la pila.

Jo seguiré la classificació nomenada i ordenaré les diferents piles de combustible en funció de la seva temperatura aproximada d'operació, també explicaré les característiques a destacar de cada model i els camps d'aplicació de cadascuna. Cal mencionar que em centraré més en les piles PEMFC donat que són les que em semblen més sostenibles.

Les cel·les de combustible que presentaré són les següents:

1. PEMFC: Piles de combustible amb membrana polimèrica d'intercanvi de protons (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)
2. DMFC: Piles de combustible de metanol directe (Direct methanol fuel cell)
3. AFC: Piles de combustible alcalines (Alkaline Fuel Cell)
4. PAFC: Piles de combustible d'àcid fosforic (Phosphoric Acid Fuel Cell)
5. MCFC: Piles de combustible de carbonat fosos (Molten Carbonate Fuel Cell)
6. SOFC: Piles de combustible d'òxid sòlid (Solid Oxide Fuel Cell)

Aquestes piles de combustible es poden separar en dos grups principals les que funcionen en altes temperatures (més de 250 °C) i les que funcionen a baixes temperatures (menors a 250 °C).

Piles de baixa temperatura	Piles d'alta temperatura
PEMFC DMFC AFC PAFC	MCFC SOFC

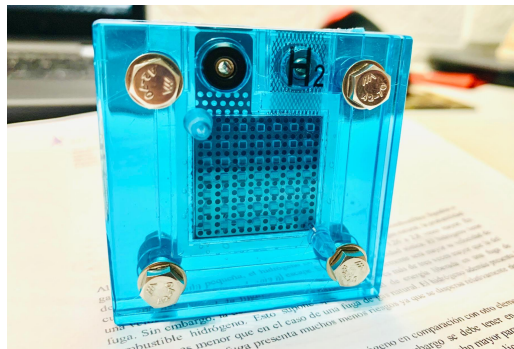
## Piles de combustible amb Membrana d'intercanvi protonic.

### Característiques

Les piles PEMFC poden proporcionar una densitat d'energia elevada i tenen l'avantatge de ser lleugeres i petites amb relació a altres piles de combustible o bateries convencionals. A més, el seu funcionament a baixes temperatures permet que el temps de reacció sigui menor i, els problemes de corrosió són gairebé inexistents perquè l'únic residu és aigua.

Per altra banda, és sensible a la contaminació per CO (monòxid de carboni) el que pot ser un inconvenient si l'hidrogen prové d'hidrocarburs o alcohols. I s'ha de controlar la gestió de l'aigua dins de la membrana perquè, si la membrana deixa d'estar humida; la conductivitat protònica baixa generant una baixada en el rendiment de la pila. I si s'inunda; els porus del càtode es bloquegen, impeding les reaccions de reducció de l'oxigen.

Els usos de les piles PEM poden fer funcionar cotxes, autobusos, trens, avions, camions, grues, carretes, tractors, bicicletes elèctriques... gairebé qualsevol vehicle motoritzat o instal·lació estacionària. Al ser una pila de baixa temperatura té poc temps de reacció i és millor per aparells que necessiten ser engegats ràpidament.

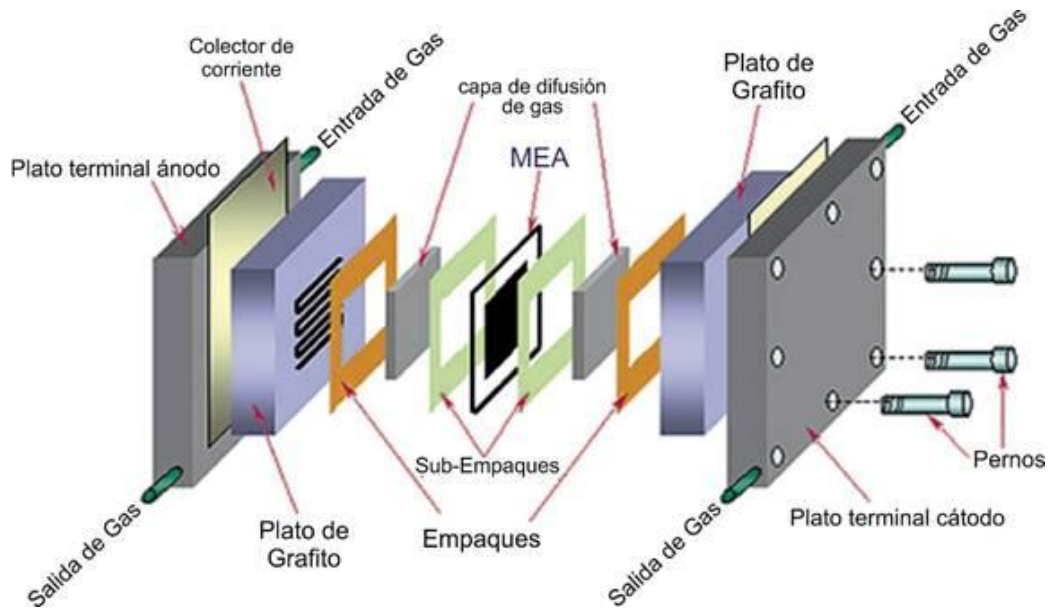


Imatge d'una pila PEM

Font: elaboració pròpia

Els components principals d'una pila PEM són: els elèctrodes, la membrana, la MEA "membrane electrode assembly", la GDL "Gas Diffusion Layer", les plaques bipolars i les plaques terminals.

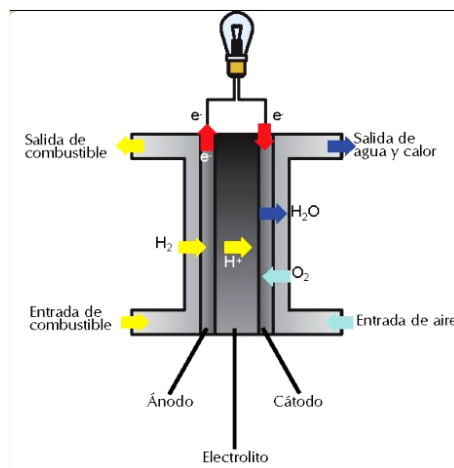
La MEA està format per un material porós recobert per partícules catalitzadores que ajuden a accelerar les reaccions. La capa difusora de gasos (GDL) té la funció de difuminar els gasos de forma homogènia a les partícules catalitzadores. Les plaques bipolars connecten les diferents cel·les per formar Stacks. I les plaques terminals són les encarregades de tancar el stack, hi ha una a cada costat i han de proporcionar hermeticitat al conjunt, a més, ha de tenir les connexions per l'entrada i sortida dels reactants ( $H_2$  i  $O_2$ ) i productes ( $H_2O$ ).



Esquema de les parts que conformen una pila de combustible tipus PEMFC  
 FONT: <http://www.energia2012.es/>

Les reaccions que tenen lloc i l'esquema d'aquesta pila són:

Elèctrode	Tipus de reacció	Reacció química
Ànode	semireacció d'oxidació	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
Càtode	semireacció de reducció	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
	reacció general	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + \text{electricitat} + \text{calor}$



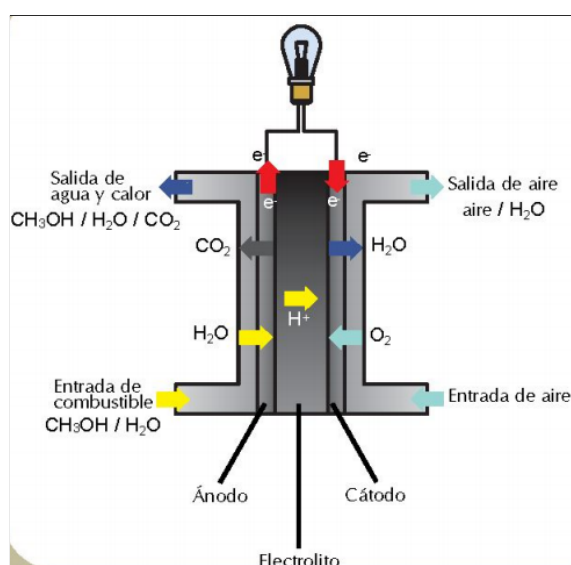
Esquema del funcionament químic intern d'una pila de combustible tipus PEMFC

Font: [www.bibliotecadigital.jcyl.es](http://www.bibliotecadigital.jcyl.es)

## Piles de combustible de metanol directe

És semblant a la pila PEM perquè té una membrana com electròlit, però fa servir metanol sobre l'ànode. Les reaccions interiors són les següents:

	Reaccions químiques
Ànode (semireacció d'oxidació)	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- + \text{CO}_2$
Càtode (semireacció de reducció)	$3/2\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3 \text{H}_2\text{O}$
Reacció Global	$\text{CH}_3\text{OH} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$



Esquema del funcionament intern i les parts d'una pila de combustible DMFC

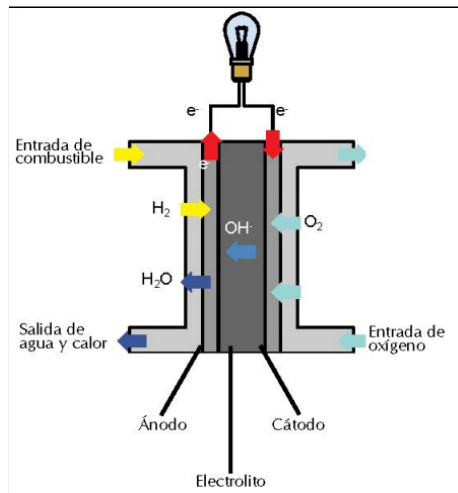
Font: [www.biblioteca digital.jcyl.es](http://www.biblioteca digital.jcyl.es)

## Cel·les de combustible alcalines

Aquest model de pila va ser desenvolupat per aplicacions espacials a l'Apolo i les aplicacions que té van molt encaminades a la indústria aeroespacial i militar. El seu electròlit és una solució aquosa de KOH i els elèctrodes estan fets de níquel i carboni actiu recoberts de catalitzadors molt diversos com; Platí (Pt), Pal·ladi (Pd) i Or (Au). Les reaccions redox d'aquesta pila són les següents:

	Reacció Química
Ànode (semireacció de reducció)	$2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- + \text{O}_2 \rightarrow 4(\text{OH})^-$
Càtode (semireacció d'oxidació)	$2\text{H}_2 + 4(\text{OH})^- \rightarrow 4\text{e}^- + 4\text{H}_2\text{O}$
Reacció Global	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Al següent esquema es mostra una pila de combustible de tipus AFC, on s'indiquen les parts importants i les reaccions, mencionades anteriorment, que hi ha al seu interior.



Esquema del funcionament intern i les parts d'una pila de combustible alcalina  
 FONT: [www.biblioteca digital.jcyl.es](http://www.biblioteca digital.jcyl.es)

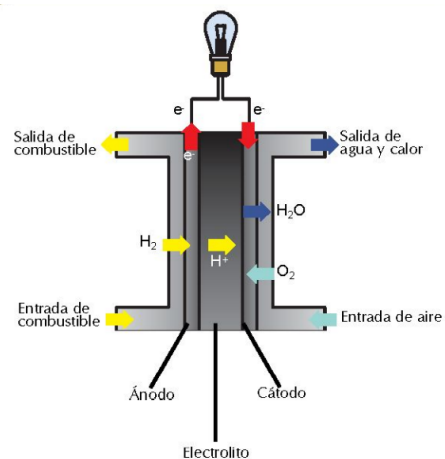
### Cel·les de combustible d'àcid fosfòric

És la més desenvolupada en l'àmbit comercial. Les seves aplicacions són tan diverses com; edificis, escoles, hospitals, hotels... El seu electrolit és una solució aquosa d'àcid fosfòric  $H_3PO_4$  (líquid) concentrat al 100%. I els seus elèctrodes són unes làmines fines de carbó actiu recobertes de Platí (Pt). Les reaccions electroquímiques que hi ha dins la pila són;

	Reacció Química
Ànode (semireacció d'oxidació)	$2H_2(g) \rightarrow 4H^+(aq) + 4e^-$
Càtode (semireacció de reducció)	$O_2(g) + 4e^- + 4H^+ \rightarrow 2H_2O(l)$
Reacció Global	$2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(l)$

A la següent imatge es poden observar les parts del disseny comentat i, les relacions químiques de la graella.

Esquema del funcionament intern i les parts d'una pila de combustible PAFC  
 Font: [www.biblioteca digital.jcyl.es](http://www.biblioteca digital.jcyl.es)



## Cel·les de combustible de carbonat fos

És una pila d'alta temperatura que és utilitzada principalment en centrals d'energia mitjanes i grans pel seu rendiment i perquè la calor residual es pot aprofitar en cogeneració. Un avantatge que mostra aquest model és que permet reformar combustibles com ara; gas natural o biogàs. I també mostra flexibilitat per escollir combustibles; Hidrogen (H<sub>2</sub>), Monòxid de carboni (CO), Propà (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) o gas natural. Per altra banda, no requereix d'un catalitzador molt bo perquè als 600 °c la cinètica de les reaccions augmenta considerablement i no cal un catalitzador tan car.

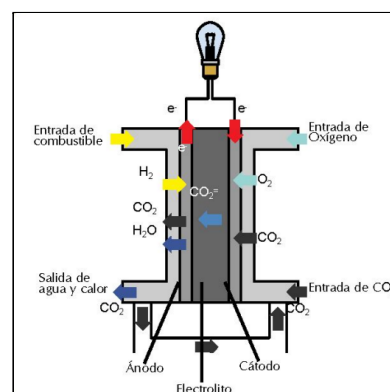
No obstant això, presenta més problemes de corrosió, estabilitat mecànica i la seva vida útil és més curta

Les reaccions redox de les piles MCFC són:

Tipus de reacció	Reacció química
Ànode: Semireacció d'oxidació	$H_2 (g) + CO_3^{2-} \rightarrow 2e^- + H_2O (g) + CO_2 (g)$
Càtode: Semireacció de reducció	$\frac{1}{2} O_2 (g) + CO_2 (g) + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
Global	$H_2 (g) + \frac{1}{2} O_2 (g) \rightarrow H_2O (g)$

Esquema del funcionament intern i les parts d'una pila de combustible MCFC

Font: [www.bibliotecadigital.jcyl.es](http://www.bibliotecadigital.jcyl.es)



## Cel·les de combustible d'òxid sòlid

Aquesta és la pila que treballa a temperatures més altes i les seves aplicacions només poden ser estàtiques. Els avantatges i inconvenients que presenta són els mateixos que a les piles MCFC. Amb l'excepció que al tenir un electròlit sòlid té menys problemes de corrosió i es pot adaptar millor la forma.

Tipus de reacció	Reacció química
Ànode: Semireacció d'oxidació	$H_2 (g) + O^{2-} \rightarrow 2e^- + H_2O (g)$
Càtode: Semireacció de reducció	$\frac{1}{2} O_2 (g) + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
Global	$H_2 (g) + \frac{1}{2} O_2 (g) \rightarrow H_2O (g)$

## Graella comparativa de piles de combustible

Tipus	PEMFC	DMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Temperatura de funcionament	50-100°C	50-120°C	100-120°C 200-250°C	150-220°C	600-700°C	600-1000°C
Electròlit	membrana de polímer sòlid	membrana de polímer sòlid	solució acuosa de KOH	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (l)	solució de LiKCO <sub>3</sub>	Òxid sòlid o (Y-ZrO <sub>2</sub> ) material ceràmic
Eficiència	40% (85% amb cogeneració)		55% 70%	40%-50%	50-60% (85% amb cogeneració)	60% (75% amb cogeneració)
Rang de potència	5-250kW		5-150kW 300w-5Kw	50kW-11MW	10kW- 2MW	5kW
Combustible	Hidrogen gas amb poc CO	Aire/Metanol	Hidrogen pur	Hidrogen	Hidrogen amb poc CO <sub>2</sub>	Hidrogen amb poc CO i CO <sub>2</sub>
Oxidant	Oxigen	Oxigen	Oxigen mol pur (CO <sub>2</sub> <50ppm)	Aire sec	2 mols de CO <sub>2</sub> i 1 mol de O <sub>2</sub>	Aire
Ió de transport	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
Avantatges	-Baixa temperatura de funcionament. -Temps de reacció curt. -Baixa corrosió. -Poc manteniment. -Elevada densitat d'energia.	-No requereix reformador de combustible. -Major disponibilitat de combustible.	-Gran eficiència. -Bones aplicacions espacials.	-Accepta H <sub>2</sub> poc pur. -Eficients. -Són segures. -Molt investigades.	-Reformat intern. -Cogeneració. -Silenciosa. -Molt eficients. -Aplicacions de cogeneració.	-Reformat intern. -Cogeneració. -Alt rendiment.
Inconvenients	eficiència relativament baixa.	-Requereix molts catalitzadors. - Està menys investigada.	-L'electròlit reacciona amb CO <sub>2</sub> .	-Gran volum. -Pesada -relativament costosa. - Cal eliminar el sofre del combustible abans .	- Gran volum. -Temperatures molt altes de funcionament. -Inversió elevada	-Gran volum. -Temperature s molt altes de funcionament. -Usos a gran escala
Aplicacions	-Portàtils -Transport -Vehicles	-Dispositius elèctrics portàtils	-Aplicacions espacials i militars -Transport	-Aplicacions estacionàries -Cogeneració en edificis. -Portàtils	-Generació centralitzada d'energia -Generació d'energia a centrals elèctriques	Sistemes auxiliars en automoció -Generació d'electricitat a gran escala i calor

## **6- CONSEQÜÈNCIES MEDIAMBIENTALS DE LES PILES DE COMBUSTIBLE**

Les conseqüències mediambientals poden ser diverses segons el tipus de pila i altres factors. Per exemple; en el cas de les piles PEM, AFC, PAFC, MCFC, SOFC, no hi ha cap emissió de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera, només generen vapor d'aigua, però, si l'hidrogen utilitzat en aquests dispositius no és d'origen renovable no es pot dir que sigui un procés 100% verd, perquè encara que les piles no emeten CO<sub>2</sub> directament l'obtenció del seu hidrogen sí.

L'opció que des de el meu punt de vista és millor és la d'utilitzar piles del primer grup amb hidrogen verd perquè d'aquesta manera l'hidrogen actua com una bateria 100% que només genera aigua i electricitat.

### **6.1- Efectes mediambientals (comparat amb altres combustibles)**

Les piles de combustible poden ser 100% o no com he mencionat a l'apartat anterior, però, per fer-se una idea de quin és el seu impacte ambiental comparat amb altres combustibles faré un breu anàlisis.

El Dièsel i la benzina són els combustibles més usats a escala mundial i són destil·lats del petroli. Per aconseguir que siguin com els coneixem cal un procés de refinament que emet CO<sub>2</sub>, un procés per reduir el contingut de sofre que també emet CO<sub>2</sub> i també cal Hidrogen, que avui dia és gris, el que fa que es contami l'atmosfera amb més CO<sub>2</sub>. Tot això per produir els combustibles, si ens fixem en les emissions de CO<sub>2</sub> per unitat de volum al transport tenim que el dièsel produeix 2,7 kg CO<sub>2</sub>/litre i la benzina una mica menys: 2,2 kg CO<sub>2</sub>/litre.

Si comparem amb el que poden arribar a generar les piles de combustible més contaminant que hi ha encara podem apreciar que els combustibles fòssils són més nocius.

### **6.2- La vall de l'hidrogen de Catalunya**

Per elaborar aquest apartat he comptat amb la col·laboració de Jordi Cartanyà, el coordinador del projecte "Vall de l'hidrogen de Catalunya". Aquest projecte es coordina des de la universitat Rovira i Virgili i ja agrupa gairebé 160 organitzacions públiques i privades que tenen l'objectiu "d'aglutinar tots els agents que integren la cadena de valor de l'hidrogen verd i impulsar el coneixement, la producció i la implementació d'aquesta alternativa energètica", segons la seva pàgina web.

Ara bé, què és la vall d'hidrogen?, doncs és el nom que s'ha donat a Europa per aquelles regions que vulguin ser líders en la introducció de l'hidrogen verd. I Catalunya reuneix una sèrie de condicions que es creu que poden ser favorables per tornar-se un model a seguir en la producció d'hidrogen verd.

Per aconseguir aquest objectiu hi ha una sèrie de projectes coordinats per la URV que tracten de facilitar la implantació de l'H2 Verd els projectes que tenen són:

- Indústria

Que té com a objectiu implementar l'hidrogen verd per: fer funcionar maquinària pesant, per generar calor al sector industrial, per produir productes químics com l'amoníac i moltes coses més.

- Mobilitat

Es vol implantar l'hidrogen com a combustible per a vehicles de tota mena, però, sobretot hi ha una gran probabilitat que al futur substitueixi els camions i autobusos actuals i els elèctrics perquè a diferència de les bateries elèctriques les piles de combustible no pesen tant i el seu temps de recàrrega és similar al dels vehicles de dièsel o benzina

- Producció i Logística

Organitza i planifica com es podrà produir tot el gas necessari i com es pot aconseguir tota l'energia renovable necessària.

- R+D+I

Aquest sector es dedica a investigar i desenvolupar tecnologia relacionada. Alguns d'aquests són: Produir hidrogen verd a baix preu, distribuir l'hidrogen a baix preu, desenvolupar hidrolineres i hidrogeneres, desenvolupament de la legislació i normativa mediambiental i de seguretat...

- Formació i Socialització

Busca promoure la consciència social al respecte i divulgar les característiques d'aquesta tecnologia a gent nova a més d'altres temes.

## 7- Part pràctica del TdR

### Experimentació

Dintre de la part pràctica d'aquest treball he fet diversos experiments per entendre millor alguns conceptes explicats a la part teòrica. És important destacar que el meu objectiu inicial va ser conèixer i experimentar amb el procés d'obtenció d'hidrogen i els diferents procediments d'electròlisis de l'aigua. Ja que aquest principi és la base per al funcionament de la pila de combustible.

A cada pràctica introduiré l'objectiu, el material necessari, el mètode o procés que he seguit, l'explicació (que pot o no estar acompanyada de càlculs que ho sostinguin), i conclusions i observacions. També poden haver altres subapartats com problemes o dificultats si n'hi ha hagut.

### 7.1- Pràctica 1:                      Electròlisis de l'aigua

#### Objectiu

L'objectiu d'aquesta pràctica és aconseguir veure com es produeix l'electròlisis de l'aigua o hidròlisis i demostrar així que es pot aconseguir hidrogen i oxigen a partir de l'aigua i també utilitzar aquests gasos a una pila de combustible.

#### Material

- Cel·la electrolítica (pot servir un recipient de plàstic o de vidre)
- Dues provetes o tubs de vidre per emmagatzemar els gasos
- Una font d'energia de corrent continu de 9 V o més
- Dos elèctrodes de carboni (jo he aconseguit el carboni a partir de dues piles Zinc-carboni gastades)
- Aigua desionitzada
- Sal (sense iode)
- Soda càustica (NaOH)
- Dos cables
- Una cullera
- Una pistola de silicona calenta
- Guants de làtex
- Ulleres de protecció
- Un tester
- Suport
- Balança
- Recipient mil·limetrat

- Cullera o vareta per remoure
- Connectors elèctrics.



Imatge del material requerit

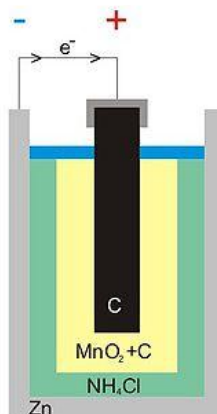
Font: elaboració pròpia

## Procediment

1. Primer, he obtingut els elèctrodes de carboni. En el meu cas no en tinc de forma directa i el que he fet per aconseguir-ho és el següent: he agafat dues piles de tipus "zinc-carboni" i amb l'ajuda d'unes alicates i amb molta cura he tret el nucli de carboni de dues piles. És una part semblant a la que surt a la imatge següent.



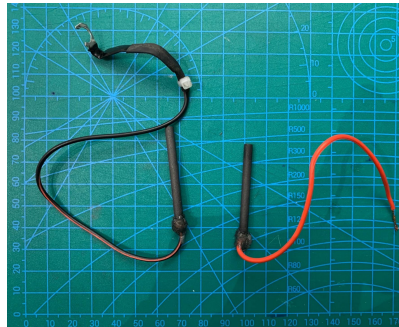
Font: elaboració pròpia



Font: [www.google.es](http://www.google.es)

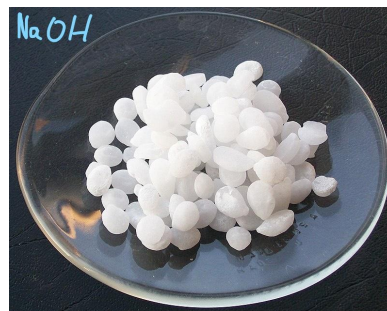
Per fer això és millor portar guants de làtex i ulleres, ja que tot i que els elements de la pila no són altament tòxics (si no s'ingereixen) és millor prevenir qualsevol contacte amb les substàncies internes.

2. A continuació he unit els elèctrodes aconseguits anteriorment amb dos cables conductors que serveixen per connectar les parts amb la bateria o font d'alimentació. Això ho he fet amb una pistola de silicona perquè quedi tot molt més hermètic a l'hora de submergir els elèctrodes a l'electròlit. A mi m'ha va quedar així:



Font: elaboració pròpia

3. Després he omplert la cel·la electrolítica amb (150 mL) d'aigua destil·lada i he afegit l'electròlit; sosa càustica NaOH (1 gram).



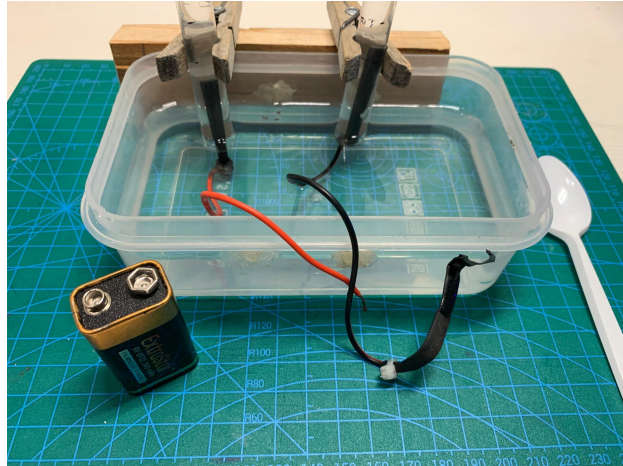
Font: elaboració pròpia

4. A continuació he barrejat molt bé les dues substàncies perquè quedi una barreja homogènia i he omplert els dos tubs de vidre amb l'electròlit. És important que quan es manipuli la sosa càustica s'utilitzin guants i ulleres de protecció.



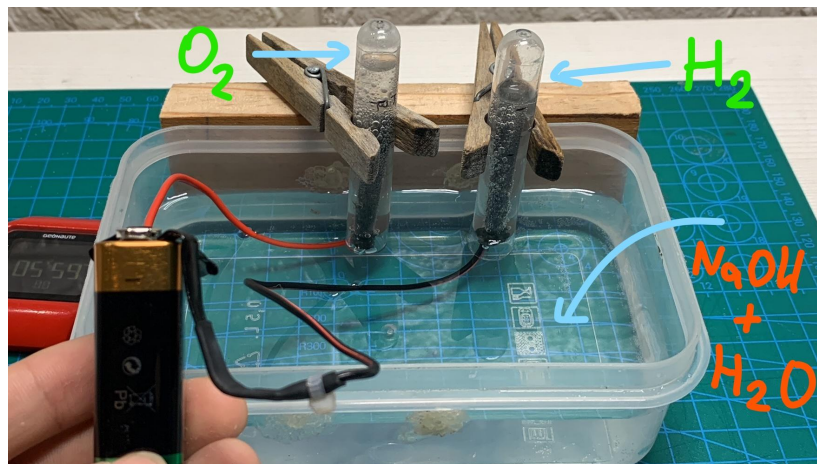
Font: elaboració pròpia

5. Tot seguit he omplert els dos tubs amb la dissolució i els he fixat cap a baix amb l'ajuda d'un suport improvisat. I he ficat els elèctrodes dins dels tubs perquè així els gasos emesos es quedin atrapats a l'interior. De la manera que es mostra a continuació.



Font: elaboració pròpia

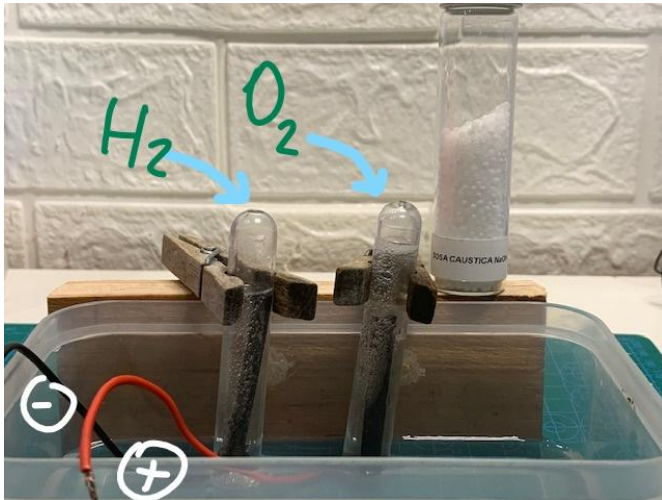
6. Després només he hagut de connectar els elèctrodes a una bateria de 9 V i veure com es produeix l'electròlisi. Al càtode (elèctrode negatiu) es produeixen unes bombolles d'hidrogen H<sub>2</sub> i a l'ànode (elèctrode positiu) s'agrupa l'O<sub>2</sub>.



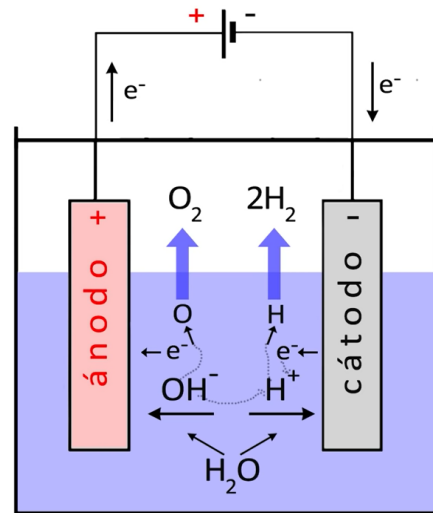
Font: elaboració pròpia

7. A les imatges següents es veuen els resultats obtinguts i un esquema del que passa químicament. Podem observar que hi ha el doble d'H<sub>2</sub> que d'O<sub>2</sub> això ens indica que l'experiment ha funcionat correctament perquè segons la reacció química ha d'haver-hi dos mols d'H<sub>2</sub> per cada mol d'O<sub>2</sub>.



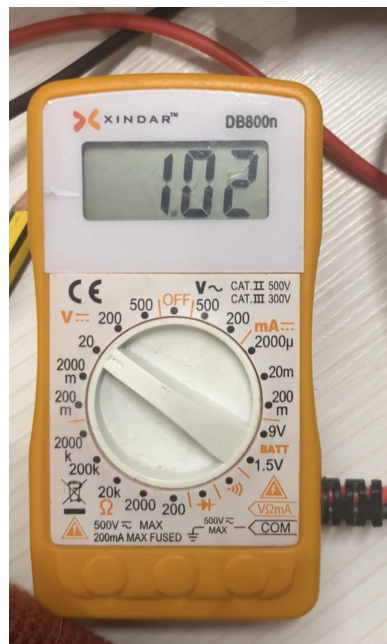


Font: elaboració pròpia



Font: www.google.es

8. Perquè aquest sistema es comporti com una bateria o més ben dit com una pila de combustible només he desconnectat la font d'alimentació, i al seu lloc he connectat un voltímetre per comprovar que els reactius estan generant un corrent elèctric. A la imatge següent es veu que el voltatge que em dóna la meua pila de combustible es de 1,01 -1,03 V en cc



Font: elaboració pròpia

### Explicació i Càlculs

El que he fet de forma resumida amb aquest experiment ha sigut fer circular un corrent elèctric per un electròlit que ha generat dos gasos: O<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>. Però el més interessant és perquè passa tot això.

Primer hem de saber que l'electròlisi es fa perquè l'aigua no es disgrega en O<sub>2</sub> i H<sub>2</sub> de forma espontània. Com ens mostra la variació d'energia lliure de Gibbs de la reacció química. Per entendre això cal saber que l'energia lliure de Gibbs s'expressa amb el símbol: G

I que

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

- **$\Delta H$**  és la variació d'entalpia i s'expressa com:  
 $\Delta H = \Sigma H (\text{productes}) - \Sigma H (\text{reactius})$  SI (J/mol)
- **$\Delta S$**  és la variació d'entropia de la reacció i s'expressa com:  
 $\Delta S = \Sigma S (\text{productes}) - \Sigma S (\text{reactius})$  SI (J / K·mol)
- **T** és la temperatura a la qual es produeix la reacció SI (K) Kelvin

La diferència d'energia lliure de Gibbs ens indica si una reacció és o no espontània a una temperatura i condicions determinades

<b>Si <math>\Delta G &lt; 0</math></b>	És una reacció espontània.
<b>Si <math>\Delta G &gt; 0</math></b>	No és una reacció espontània. Cal subministrar energia perquè la reacció es produeixi.
<b>Si <math>\Delta G = 0</math></b>	El sistema es manté en equilibri.

Podem aplicar això a la nostra reacció, només ens cal buscar els valor d'entropia i d'entalpia de cada element de la reacció:  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2$

Element	Entropia $\rightarrow S$ (J /K·mol)	Entalpia $\rightarrow H$ (KJ/mol)
H <sub>2</sub> (gas)	130,7	0
O <sub>2</sub> (gas)	205,0	0
H <sub>2</sub> O (Liquid)	69,9	-285,8

$$\Delta H = 1 \cdot (0) + 0 - (-285,8 \cdot 10^3) = 285,8 \cdot 10^3 \text{ J}$$

$$\Delta S = 130,7 + 205,0/2 - (69,9) = 163,3 \text{ J/K}$$

$$\Delta G = 285,8 \cdot 10^3 \text{ J} - (298 \text{ K}) \cdot 163,3 \text{ J/K} = 237,14 \text{ KJ}$$

$\Delta G = 237,14 \text{ KJ} > 0 \rightarrow$  la reacció NO és espontània

No obstant no estem en un cas ideal, i l'energia requerida per produir l'electròlisi està determinada per la variació d'entalpia ( $\Delta H$ )

L'energia requerida segueix aquesta fórmula:

$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S$$

I l'energia requerida es pot representar de la següent manera:

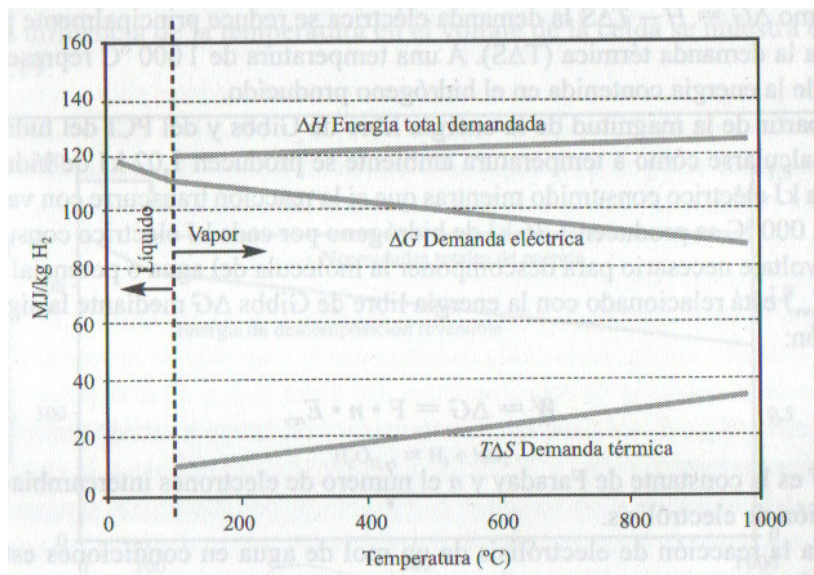


Diagrama de les magnituds termodinàmiques de la reacció d'electròlisi segons la temperatura (a 1 atmosfera de pressió)

Font: Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos eneréticos

Podem observar que l'energia necessària està formada per  $\Delta G$  i  $T\Delta S$  i per continuar cal conèixer la relació entre el potencial reversible (voltatge necessari per fer l'electròlisi) i l'energia lliure de Gibbs ( $\Delta G$ ):

$$W = -\Delta G = n \cdot F \cdot E \text{ reversible}$$

**W** és l'energia o treball necessari.

**n** és el nombre d'electrons d'intercanvi

**F** és la constant de Faraday (és la unitat de càrrega elèctrica que té un mol d'electrons) el seu valor és 96485,332.

**E reversible** es mesura en volts i és el potencial reversible.

Si aïllem E (reversible):

$$E_{reversible} = \Delta G/n \cdot F$$

$$\frac{237136.6}{2 \times 96485.332} = 1.228873835 \sim 1,23 \text{ V}$$

Aquest valor també es pot buscar per internet o a llibres de text, però a mi m'ha semblat millor mostrar d'on prové.

De moment podem deduir que per produir l'electròlisi, i aconseguir el valor de  $\Delta H$  necessari, hem de crear una diferència de voltatge d'1,23 V i afegir calor. Tanmateix, també podem afegir més voltatge en lloc de calor.

$$T \cdot \Delta S = n \cdot F \cdot \Delta E_q$$

$$\Delta E_q = T \cdot \Delta S / n \cdot F$$

$$\Delta E_q = (298 \text{ K} \cdot 163,3 \text{ J/K}) / (2 \cdot 96485,332) = 0,253 \text{ V}$$

Aquest voltatge és el que l'hi hem d'afegir al E (reversible) perquè es produeixi la reacció sense haver d'incrementar la temperatura.

$$1,23 \text{ V} + 0,252 \text{ V} = 1,48 \text{ V}$$

I si ens fixem a la meua part experimental, podem observar que jo he utilitzat una font d'alimentació de 9 V, que és molt més del necessari (1,48 V), això ho he fet perquè la reacció es produeixi més de pressa i no calgui esperar tant de temps per veure els resultats de l'experiment.

Finalment, he decidit calcular el rendiment d'aquesta cel·la de combustible.

$$\eta_{el} = \eta_{ideal} \cdot V_{real} / V_{ideal}$$

- $\eta_{el}$  és el rendiment elèctric de la pila.
- **V real** és el voltatge real de la cèl·lula, que en el meu cas em dona 1,02 V
- **V ideal** és el voltatge que donaria la pila en condicions ideals.
- $\eta_{ideal}$  és el màxim rendiment que pot assolir la reacció per qüestions termodinàmiques.

Si  $\Delta G$  és l'energia ideal i que  $\Delta H$  és la requerida realment podem deduir que:

$$\eta_{ideal} = \Delta G / \Delta H$$

I si apliquem:  $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$

Ens queda que:

$$\eta_{ideal} = (\Delta H - T \cdot \Delta S) / (\Delta H)$$

$$\eta_{ideal} = 1 - (T \Delta S / \Delta H)$$

Aplicant els valors aconseguits anteriorment:

$$\eta_{ideal} = 1 - (298 \text{ K} \cdot 163,3 \text{ J/K}) / (285,8 \cdot 10^3) = 0,83 \rightarrow \text{l'eficiència ideal és del 83\%}$$

Per trobar el rendiment de la meua pila de combustible apliquem aquest valor a la fórmula del  $\eta_{el}$ :

$$\eta_{el} = (0,83 \cdot 1,02) / 1,23 = 0,69 \rightarrow \text{l'eficiència de la pila és del 69\%}$$

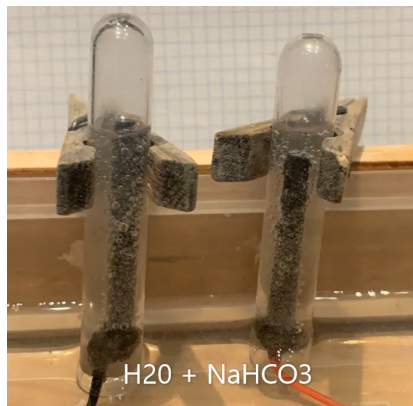
### **Problemes o dificultats**

En primer lloc, no sabia com aconseguir uns elèctrodes de carboni pur i al primer intent vaig intentar-ho amb la mina de dos llapis, però com no eren de carboni pur no van funcionar bé. A la part del muntatge; les connexions entre els cables i els elèctrodes no eren totalment hermètiques i el coure del cable va començar a reaccionar, vaig haver d'utilitzar silicona calenta en lloc d'un tub termoretràctil. I per acabar, el diàmetre dels cables era massa gruixut el primer cop i novament no em permetien una bona conductivitat.

### **Conclusions i Observacions**

Amb aquest experiment puc concloure que l'electròlisi de l'aigua és un procés força senzill de realitzar, però que amaga molts conceptes al seu interior. Aquest experiment demostra que es pot obtenir H<sub>2</sub> de forma molt pura i que el rendiment que proporciona és molt elevat (si es compara amb una reacció de combustió).

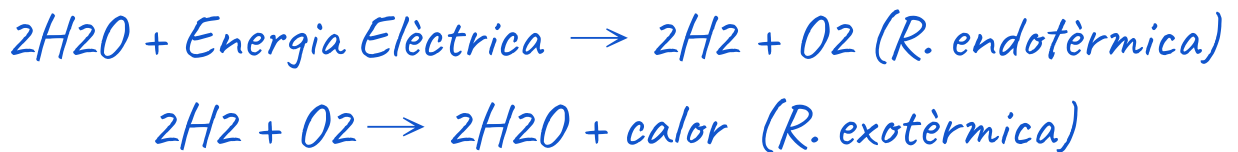
El procés es pot provar de fer amb altres electròlits, jo ho he intentat fer amb vinagre-H<sub>2</sub>O, amb bicarbonat de sodi, amb NaCl (sal iodada) i amb KOH en el cas del primer no em va funcionar perquè a l'ànode no es produïa gens de gas. Amb bicarbonat de sodi sí que surt gas als dos elèctrodes, però la proporció no és de 2 H<sub>2</sub> / 1 O<sub>2</sub> (com es veu a la següent imatge) i amb NaCl si funciona, no obstant això, també es forma una mica de Clor Cl als elèctrodes. I amb KOH té els mateixos resultats que amb NaOH.



Imatge dels gasos obtinguts a la reacció d'electròlisi de l'aigua amb bicarbonat dissolt

Font: elaboració pròpia

També puc concloure que és un experiment força interessant des del punt termoquímic, ja que es pot aconseguir el rendiment de la reacció i veure alguns conceptes com per exemple; l'energia lliure de Gibbs, l'entalpia, l'entropia, els processos espontanis i els no espontanis... Si hagués de resumir l'experiment ràpidament, ho faria amb aquest esquema:



Es veu fàcilment que el que hem fet és donar energia a l'aigua per produir l'electròlisi i que després els gasos obtinguts ens han retornat part d'aquesta energia en un procés exotèrmic. I en definitiva puc concloure que l'hidrogen es pot considerar com un bon vector energètic.

## 7.2- Pràctica 2: Cotxet amb pila de combustible

### Introducció

En aquest experiment demostrarem que l'hidrogen mitjançant una pila de combustible pot utilitzar-se per fer funcionar un cotxe de joguina de forma totalment neta. Per demostrar-ho jo he fet servir un quid anomenat "Hydrocar FCJJ-20" de la marca "Horizon Educational" que m'ha anat molt bé per entendre com funcionen les piles de combustible i veure com es podrà arribar a aplicar aquest principi al nostre dia a dia.

## Objectiu

L'objectiu principal d'aquesta pràctica per a mi ha sigut poder veure i entendre com es produeix l'electròlisi de l'aigua amb una cèl·lula de combustible d'intercanvi protònic PEM, que en anglès són les sigles de *proton-exchange membrane* i al mateix temps comprovar que aquesta pila de combustible pot fer funcionar un cotxe elèctric de forma totalment sostenible. No obstant això, també m'agradaria poder calcular l'eficiència d'aquesta pila de combustible.

Per això, aquest experiment es podria considerar que són dos; un té com a finalitat obtenir hidrogen i oxigen i a l'altre es busca utilitzar-los per fer funcionar el motor elèctric, és a dir, fer el pas contrari a la hidròlisi.

## Material

- Cel·la de combustible reversible
- un petit panel solar
- tubs de goma i taps
- El xassís del cotxe de joguina amb motor elèctric
- Cables conductors
- una xeringa
- 100 ml d'aigua destil·lada
- dos recipients exteriors preparats per emmagatzemar l'H<sub>2</sub> i l'O<sub>2</sub>
- dos recipients interiors
- dues piles alcalines AA



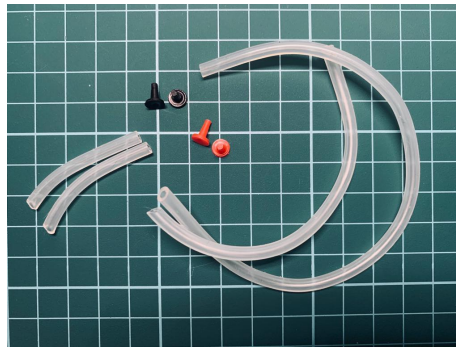
Imatge del material utilitzat a la pràctica 2

Font: elaboració pròpia

## Procés i mètode

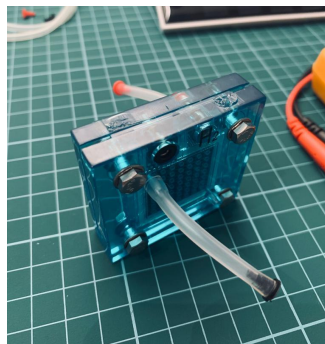
Per començar he preparat el cotxe per produir l'electròlisi de l'aigua, per fer-ho he seguit els passos següents:

1. En primer lloc, he tallat el tub de plàstic en els segments requerits; dues parts de 4 cm de llarg i dues parts que més o menys tenen uns 15 cm de llargada. M'han quedat així:



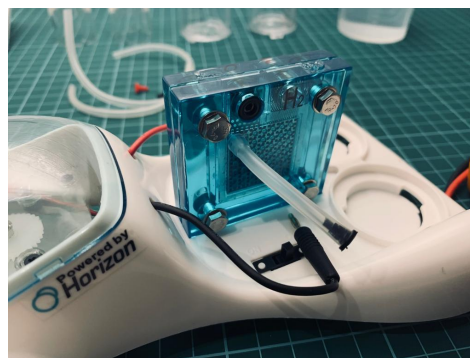
Font: elaboració pròpia

2. En segon lloc, he col·locat un tap a cada tub de 4 cm, un vermell i un negre per diferenciar-lo i a continuació he connectat el tub amb el tap negre a l'obertura superior de la pila PEM, on posa O<sub>2</sub>. I el tub amb el tap vermell l'he col·locat a la part superior del costat on posa H<sub>2</sub>.



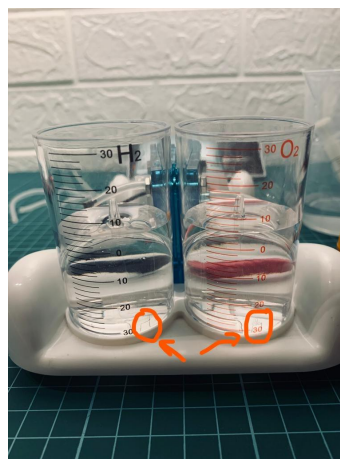
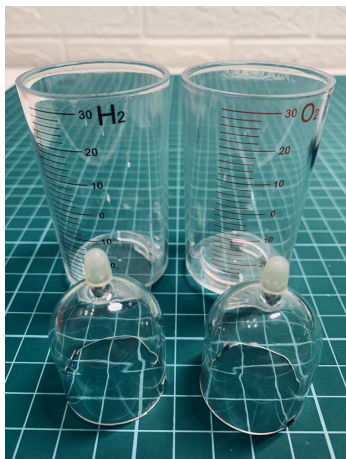
Font: elaboració pròpia

3. A continuació, he assemblet la pila PEM i els recipients exteriors al xassís del cotxe elèctric.



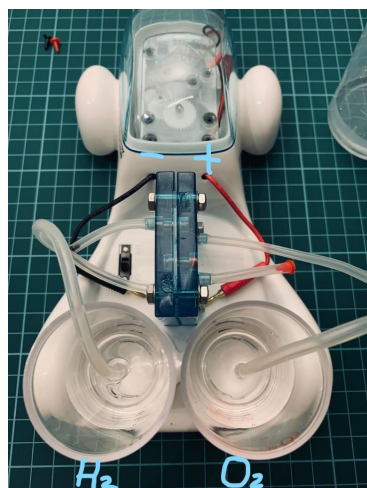
Font: elaboració pròpia

4. El següent pas ha sigut omplir els recipients exteriors amb aigua destil·lada fins a la marca del zero i tot seguit inserir els recipients interiors. A l'hora de fixar els tubs interiors s'ha de tindre compte de no deixar obstruïdes les obertures que tenen a la part inferior perquè serveixen per avaluar els gasos en el cas que se superi el màxim volum possible.



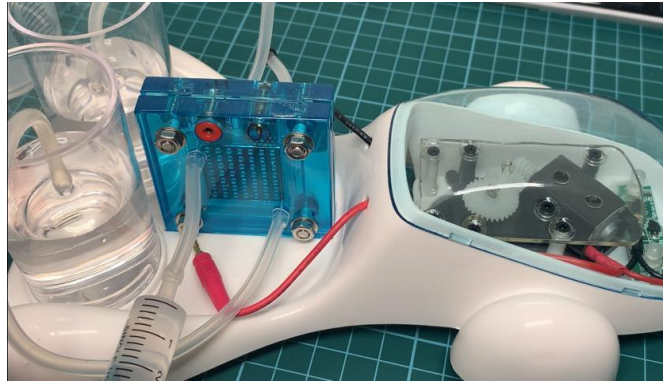
Font: elaboració pròpia

5. Posteriorment, he subjectat els tubs llargs a les sortides de gas que tenen els recipients interiors i he connectat cada dipòsit de gas amb la sortida inferior de gas de la pila. A l'hora de connectar els tubs s'ha de vigilar que no es confonguin i es connectin al costat contrari de la pila.



Font: elaboració pròpia

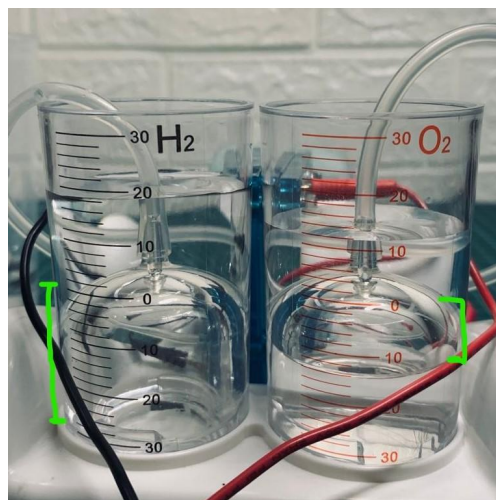
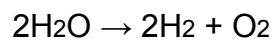
6. Després, he injectat aigua destil·lada pel tub curt de la part de l'oxigen fins a veure que la membrana de dintre de la pila estava plena d'aigua. Això ho he fet perquè és important que la membrana estigui ben hidratada per ser bona conductora iònica, si no no es produirà correctament el procés electroquímic.



Font: elaboració pròpia

Un cop realitzat aquest pas he esperat uns 5-10 min perquè la membrana estigui perfectament humidificada. I llavors he connectat els cables de la bateria als connectors corresponent de la pila. És molt important que mai s'insereixin els elèctrodes al revés perquè podem fer malbé la membrana interna

Un cop dit això, només he hagut d'engagar l'interruptor de la bateria per començar a veure com es produeix l'electròlisi dins de la pila. On millor s'aprecia l'efecte és als dos dipòsits de gas, on he pogut veure que el volum d'hidrogen és sempre el doble que el de l'oxigen el que m'indica que la reacció següent es produeix correctament.



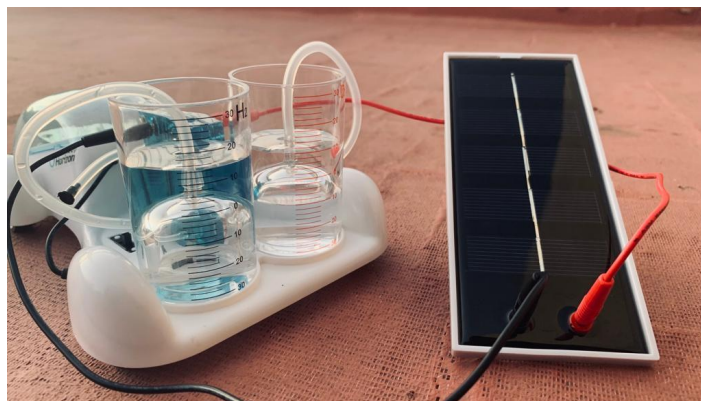
Font: elaboració pròpia

Fins aquest punt ja he aconseguit el meu primer objectiu, he realitzat correctament l'electròlisi i ja tinc l'H<sub>2</sub> i l'O<sub>2</sub> en estat gasós. Ara vull obtenir que el cotxe funcioni amb els gasos.

Abans d'aconseguir-ho presentaré una possibilitat que des del meu punt de vista és la millor per produir l'hidrogen:

Per produir l'electròlisi es necessita una font d'energia, en aquest primer cas jo he utilitzat l'energia química acumulada a les dues bateries AA, però el que més m'ha interessat ha sigut utilitzar la placa solar per produir els dos gasos, perquè d'aquesta forma el sistema sencer és 100% sostenible.

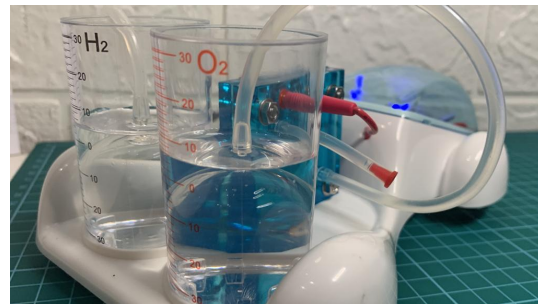
Només he necessitat substituir la bateria per la placa solar i el resultat ha sigut el mateix. Tot i que, he observat que amb la placa solar la hidròlisi es produeix més lentament.



Font: elaboració pròpia

Fet aquest apunt, per aconseguir fer funcionar el cotxe elèctric jo he fet el següent:

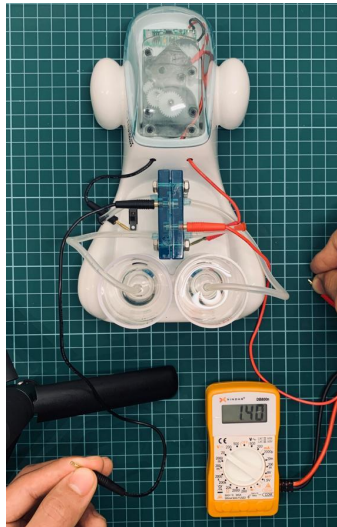
7. He desconnectat la bateria/placa solar i he endollat els dos cables que té el motor elèctric a la pila. Per engegar-ho he polsat l'interruptor del motor i ja està. El cotxe s'ha engegat i s'ha començat a moure al mateix temps que unes llums blaves al seu davant feien pampallugues.



Font: elaboració pròpia

Tot i que no va massa ràpid demostra que l'hidrogen és un candidat a tindre en compte de cara al futur pròxim.

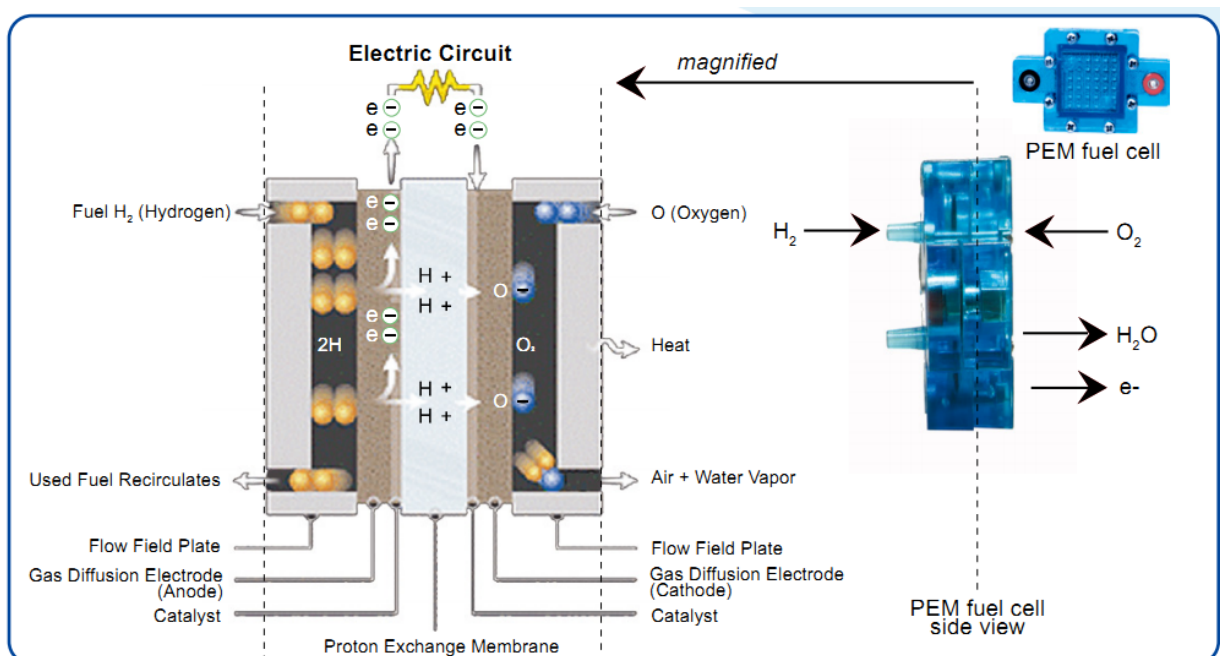
Per concloure l'experiment he mesurat el voltatge que dona la pila PEM per poder calcular el seu rendiment a continuació, tenint en compte que el meu stack conté dues piles, he de dividir el voltatge obtingut entre dos.



Font: elaboració pròpia

## Funcionament

La pila de combustible que tenim és del tipus PEMFC i tot i que el seu funcionament ja ha estat explicat a la part teòrica de les piles de combustible intentaré explicar el seu funcionament més en detall amb l'ajuda de l'esquema següent:



Esquema del funcionament de la meua pila de combustible, tipus PEM

Font: manual d'instruccions digital del kid Hydrocar FCJJ-20

Començaré explicant el procés com si jo fos una molècula d'aigua que s'ha dividit en H<sub>2</sub> i O<sub>2</sub> per l'electròlisi.

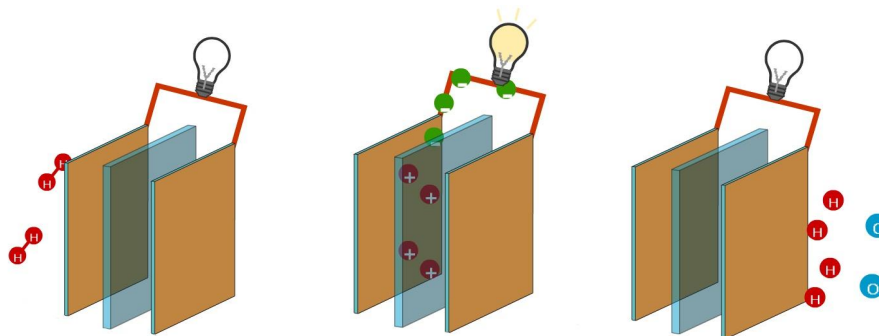
Doncs bé, ara estic dividit en dos elements, per una part l'hidrogen gas i per l'altra l'oxigen gas. Ara bé, si recordem el que he dit a la pràctica anterior sabrem que hi ha processos químics que són espontanis i que alliberen energia (reaccions exotèrmiques) i d'altre que requereixen energia (reaccions endotèrmiques).

Per saber si les meves parts dividides es tornaran a ajuntar he de veure si això seria una reacció espontània o no. Per tant, he de calcular quina és l'energia lliure de Gibbs de la reacció i veure si és menor a zero, perquè si no ho és les meves molècules no es tornaran a reagrupar per formar aigua sense un import d'energia.

La reacció  $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  té el mateix valor de  $\Delta G$  calculat a la pràctica anterior, però amb valor negatiu perquè és la reacció contrària. Com  $\Delta G < 0$ ; la reacció si és espontània.

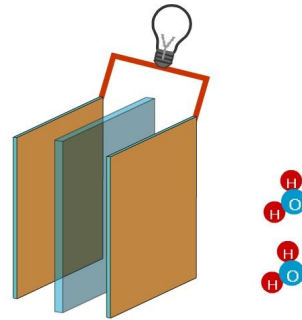
Arribats aquest punt, ja sé que les meves molècules es tornaran a ajuntar i alliberaran energia, però, ho faran de forma massa lenta per poder aprofitar l'energia alliberada. Per això s'utilitza un catalitzador a la pila de combustible, d'aquesta manera s'acceleren les reaccions químiques i es pot aprofitar l'energia que cedeix. Per això podem considerar que en realitat una pila de combustible és un dispositiu que serveix per accelerar les reaccions que alliberen energia.

Primer, l'hidrogen i l'oxigen s'injecten a la pila per dues ranures superiors com es mostra a la imatge anterior. L'hidrogen que està format per dos àtoms H, passa per la capa difusora de gasos GDL gas diffusion layers per poder distribuir-se millor sobre la superfície del catalitzador. Amb la presència d'un catalitzador la molecular es divideix en protons i electrons:  $\text{H} + \text{e}^-$ , tanmateix per combinar-se amb l'oxigen els electrons i protons han de passar a l'altre costat de la membrana d'intercanvi protònic on es troben les molècules O. No obstant, com el seu nom indica, la membrana serveix per intercanviar protons i no electrons, per aquesta raó els protons passaran per la PEM i els electrons hauran de passar per un circuit a banda.



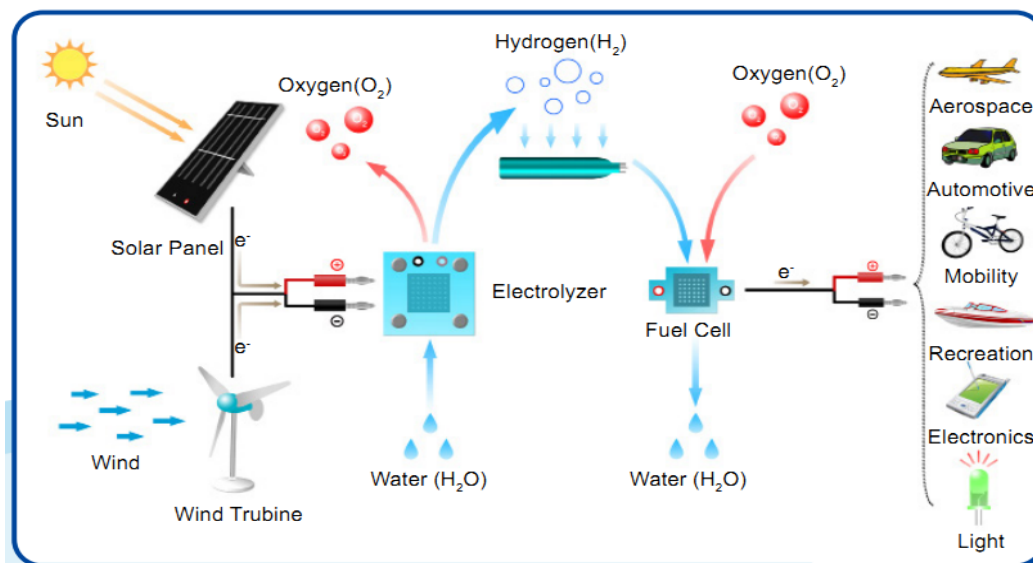
Font: manual d'instruccions digital del kid Hydrocar FCJJ-20

Finalment, els meus dos àtoms d'hidrogen, els seus dos electrons, i l'àtom d'oxigen es recombinen i passen a formar un altre cop la molècula d'aigua inicial.



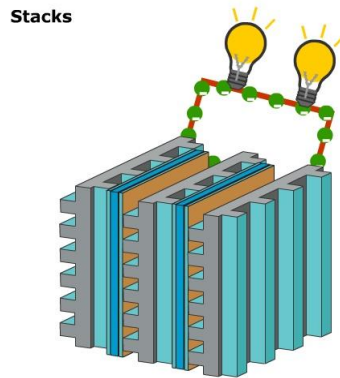
Font: manual d'instruccions digital del kid Hydrocar FCJJ-20

Però això per què ens serveix? Doncs per beneficiar-se el corrent elèctric que generen els electrons en moviment en passar pel circuit extern. A la imatge de sota hi ha un esquema de com aquest procés es pot aplicar a la nostra tecnologia de forma neta.



Font: manual d'instruccions digital del kid Hydrocar FCJJ-20

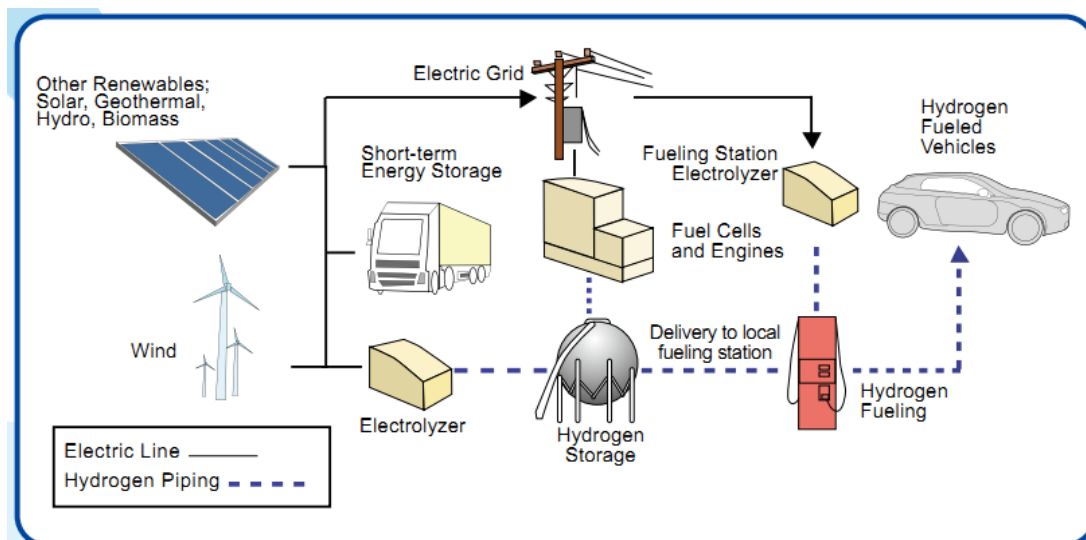
Primer podem utilitzar fonts d'energia renovables per produir hidrogen i podem emmagatzemar el gas (H2), per utilitzar-lo després a una cèl·lula de combustible i donar electricitat a tota mena de màquina elèctrica.



Representació gràfica del meu stack (apilament) de dues piles PEM

Font: manual d'instruccions digital del kid Hydrocar FCJJ-20

En el cas del transport, que és una de les principals aplicacions de les piles de combustible (sobretot en camions i transport d'alt tonatge on l'increment de pes i/o volum no es nota tant) l'esquema més apropiat seria:



Font: manual d'instruccions digital del kid Hydrocar FCJJ-20

## Conclusions i Observacions

Amb aquest experiment he aconseguit demostrar que l'hidrogen pot considerar-se un bon candidat com a vector energètic donat el seu elevat rendiment i la seva alta disponibilitat, sense mencionar que si l'electròlisi es produeix amb energia solar, eòlica o qualsevol altra font d'energia renovable, com s'ha fet en utilitzar la placa solar, l'hidrogen és verd, ja que no es genera cap emissió d'efecte hivernacle en el seu procés.

També puc afirmar que amb aquest experiment he entès perfectament en què consisteix l'electròlisi i perquè serveix. A banda, he arribat a la conclusió que les

energies renovables s'han de continuar impulsant perquè l'hidrogen no és una font d'energia, és un vector energètic i necessita energia neta.

I finalment, crec que la producció d'hidrogen pot ser molt interessant en centrals hidràuliques, solars o eòliques perquè aquestes infraestructures tenen períodes de temps amb baixa demanda energètica on poden aprofitar l'energia neta per produir hidrogen. D'aquesta manera l'hidrogen faria la mateixa funció que una bateria.

### **7.3- Pràctica 3: Juguem amb la pila de combustible**

#### **Introducció**

En aquesta pràctica s'utilitza la pila de combustible del quid per intentar fer funcionar un petit motor i una bombeta i, també s'intenta calcular l'eficiència de la pila. Serà una pràctica relativament curta.

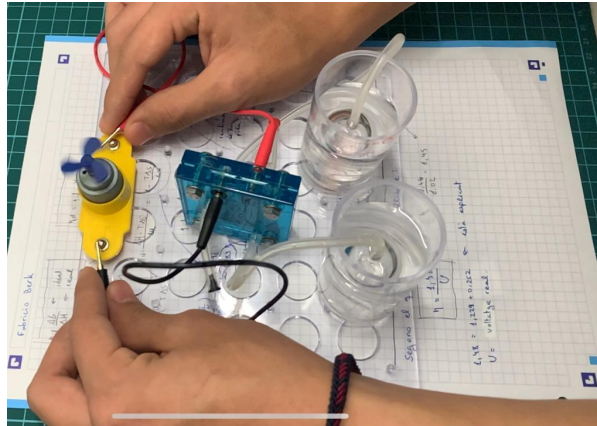
#### **Material**

- Tubs de goma
- Dipòsits de gas
- Pila de combustible reversible
- Motor elèctric
- Bombeta
- Cables conductors
- Tester
- Dues piles AA

#### **Procediment**

Primerament, he realitzat l'electròlisi de l'aigua per poder tindre els dos gasos necessaris i un cop aconseguits he improvisat un circuit molt simple per veure si podia engegar un motor. El circuit consta dels dos dipòsits de gas connectats a la pila PEM, dos cables conductors que connecten la pila amb els pols positiu/negatiu del motor. M'ha quedat d'aquesta manera:

No sé si es pot apreciar a la imatge, però el motor ha començat a girar ràpidament en tancar el circuit.

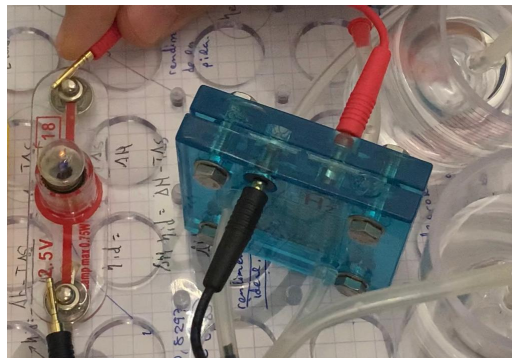


Font: elaboració pròpia

No obstant això, he de dir que no ha girat de forma totalment constant, ja que hi havia moment en què ha deixat de funcionar i de sobte al cap d'un instant ha tornat a funcionar.

La meua teoria és que el voltatge que dona la meua pila PEMFC no és suficient per abastir el motor, potser si podria funcionar millor amb dues piles de combustible, però per desgràcia jo no en tinc dues per comprovar-ho.

Una cosa similar m'ha passat en intentar encendre una bombeta. En aquest cas he de dir que hagués estat millor aconseguir una bombeta LED que funcione amb CC i no una incandescent.



Font: elaboració pròpia

Com podeu observar la bombeta que tinc funciona amb CC i a 2,5 V i el stack que tinc dona 1,4 V, el que no és suficient perquè s'encengui el llum, només s'hi ha produït una petita brillantor al fil de la bombeta.

## Càlculs

Tot i que en aquesta pràctica no ha sigut necessari cap càlcul jo he volgut saber quin és el rendiment de la pila que tinc. I per obtenir aquest valor he utilitzat els mateixos principis que a la primera pràctica "L'electròlisi de l'Aigua".

Si us interessa entendre el procediment a l'apartat "Explicació i Càlculs" de la primera pràctica, està el procés sencer. Ara només em cal aplicar l'última fórmula:

$$\eta_{el} = \eta_{ideal} \cdot V_{real} / V_{ideal}$$

I si substitueix-ho els valor que conec:

$$\eta_{el} = (0,83 \cdot 0,7 V) / 1,23 V = 0,47 \rightarrow \text{l'eficiència de la pila és del 47\%}$$

### **Observacions i conclusions**

Tot i que l'experiment no ha acabat com jo esperava considero que no ha estat pas un fracàs perquè, demostra que la pila de combustible pot donar electricitat a un altre aparell. Si ho hagués de fer una altra cop; intentaria aconseguir un stack més o una pila PEM més per poder tindre el voltatge suficient.

## 8- PERSPECTIVES DE FUTUR I CONCLUSIONS

Aquest apartat és totalment una opinió meva després d'haver fet tot aquest treball de recerca, la part experimental i haver realitzat una entrevista al coordinador de "La Vall de l'Hidrogen de Catalunya", Jordi Cartanyà.

Tinc la sensació que l'hidrogen verd jugarà un paper molt important a la descarbonització de molts sectors industrials i urbans a mitjà i llarg termini. I que els esforços que s'estan fent per poder aconseguir-ho a Catalunya tindran una conseqüència molt positiva per al medi ambient i per a la nostra salut.

Per altra banda, crec que hi ha molt problemes logístics relacionats amb abaratir aquests processos que no deixaran que sigui una tecnologia assequible per a tothom com a mínim fins al 2050 quan tota la infraestructura per produir l'hidrogen verd estigui ben cimentada i aquest gas pugui competir amb les formes de producció actuals. Un punt a favor és que he vist que tots aquests aspectes ja s'han tingut en compte i ja hi ha persones molt qualificades que estan tracten d'apropar la meta.

Cal assenyalar, que com sempre hi ha condicionant que poden fer variar en favor o en contra el temps que trigarem a gaudir de l'hidrogen verd i les piles de combustió. Com per exemple; la consciència social que tenim totes i tots per l'ús de les energies renovables o el suport que dona cada govern a propiciar les vies alternatives mencionades al llarg de tot aquest treball.

M'han recomanat que destaquí que l'hidrogen verd i les piles de combustible no només tenen aplicacions al transport sinó que hi ha infinitat d'usos tant a la indústria, a les aplicacions portàtils i a altres camps.

Per anar conclouent el treball m'agradaria fer algunes conclusions que he pogut treure sobre aquest treball tant en l'àmbit educatiu com en el personal.

Considero que ha sigut un treball molt útil perquè he après molt sobre l'hidrogen i sobre les piles de combustible, però també m'ha ensenya moltes altres coses, per exemple a documentar-me millor, filtrar i sintetitzar molta informació, ja que, hi ha hagut vegades en les quals no sabia com arribar a explicar tot allò que jo tenia al cap i aprendre a valorar el que és més important m'ha ajudat molt.

Em sembla que el temps dedicat ha sigut de profit, he après a investigar i exposar un tema d'aquesta llargada per primer cop perquè, tot i que al principi em va semblar que 40 pàgines de TdR eren moltes, si ara mateix em preguntessin, diria que són com a màxim suficients. No obstant això, a mi no m'ha semblat un treball molt extens i espero que a la persona que ho llegeixi tampoc, si més no, que li hagi resultat interessant o útil.

He gaudit molt de l'experiència que m'ha aportat aquest treball en general, fins i tot aquells moments que m'han resultat més difícils o complicats. Però la part que més m'ha agradat ha sigut la part experimental, on he pogut entendre millor que és el que estava aconseguint. Encara que, aquesta part ha sigut la més difícil per a mi.

I per finalitzar, aquest treball m'ha ajudat a reflexionar sobre com funciona el nostre món i que podem fer de forma individual i col·lectiva per millorar-ho, he entès quina importància té la recerca científica. Perquè com va dir Albert Einstein "Si busques resultats diferents no facis sempre el mateix"

## 9- REFERÈNCIES

- LLera Sastresa, Eva Ma. Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos energéticos. Prensa universitaria de Zaragoza. 1a edició, 2011. Editorial UNE (USA). Col·lecció: Textos Docentes, nº 204. Serie Energías Renovables. ISBN 978-84-15274-94-0
- González Huerta, Rosa de Guadalupe. Hidrógeno, producción y almacenamiento: Retos hacia su uso como vector energético sostenible. Editorial CreateSpace, 2013. ISBN- 13: 978-1490404219. ISBN-10: 149040421X
- EL HIDRÓGENO Y LAS PILAS DE COMBUSTIBLE EL RECORRIDO DE LA ENERGÍA. [en línia]. <[https://bibliotecadigital.jcyl.es/es/catalogo\\_imagenes/grupo.cmd?path=10121909](https://bibliotecadigital.jcyl.es/es/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=10121909)> [Consulta:3/4/2021]
- Hydrogen. [en línia]. <<http://www.ariema.com/wp-content/uploads/2019/07/layman-pdf.pdf>> [Consulta: 3/4/2021]
- PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE DE ÁCIDO FOSFÒRICO. [en línia]. <<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4842609.pdf>> [Consulta: 4/4/2021]
- Wikipedia. <Ánodo> [en línia]. <<https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81nodo>> [Consulta:11/4/2021]
- RAE <Electroquímico> [en línia]. <<https://dle.rae.es/electroqu%C3%ADmico>> [Consulta:15/4/2021]
- Wikipedia.<Electrólisis de l'aigua>[en línia] <[https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3lisis\\_del\\_agua](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3lisis_del_agua)> [Consulta: 17/5/2021]
- El Centro Nacional de Experimentación de Tecnologías de Hidrógeno y Pilas de Combustible. <Pilas de Combustible> [en línia]. <<https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>> [Consulta: 15/6/2021]
- Apilados.<Tipos de pilas de combustible y su clasificación> [en línia]. <<http://apilados.com/blog/tipos-de-pilas-de-combustible-su-clasificacion/>> [Consulta: 15/6/2021]
- Spanish Fuel Cells Association [en línia].<<https://appice.es/pilas-de-combustible/>> [Consulta:15/6/2021]
- El H2 y la pila de combustible. [en línia] <<https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno/hidrogeno-pilas-de-combustible>> [Consulta:17/6/2021]
- Wikipedia. <Pila de combustible> [en línia]. <[https://ca.wikipedia.org/wiki/Pila\\_de\\_combustible](https://ca.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible)>. [Consulta:18/6/2021]
- ABB <La pila de combustible, una central ecológica> [en línia]. <<https://new.abb.com/news/es/detail/36267/la-pila-de-combustible-una-central-ecologica>> [Consulta:18/6/2021]

- Comercial Foisa <¿Qué son las células de combustible?> [en línea].  
<https://comercialfoisa.com/que-son-las-celulas-de-combustible/> [Consulta: 20/6/2021]
- Comercial Foisa <¿Qué son las células de combustible?> [en línea]. <<https://comercialfoisa.com/como-funcionan-realmente-las-pilas-de-combustible-de-hidrogeno/>> [Consulta: 26/6/2021]
- Eduardo J. Stefanelli. <Celda de Combustible – energía eléctrica limpia – hidrógeno> [en línea]. <<https://www.stefanelli.eng.br/es/energia-electrica-hidrogeno/>> [Consulta:3/7/2021]
- Instituto de síntesis química y catálisis homogénea. <Pilas de Combustible: La Energía del Futuro> [en línea] <<http://www.isqch.unizar-csic.es/ISQCHportal/celdasDeCombustible.do>> [Consulta: 3/7/2021]
- Pilas de combustible alcalinas - AFC. [en línea].  
<[http://www.fuelcell.no/fuel\\_cell\\_types\\_afc\\_es.htm](http://www.fuelcell.no/fuel_cell_types_afc_es.htm)> [Consulta: 4/7/21]
- Wikipedia <Hydrogen>[en línea]. <<https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen>>[Consulta: 8/7/2021]
- PILAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM. [en línea].  
<<https://docplayer.es/47041785-2-pilas-de-combustible-tipo-pem.html>> [Consulta: 10/7/21]
- Rincón educativo energía y medio ambiente. <¿Qué es y de donde proviene el hidrógeno?> [en línea].  
<<https://www.rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/que-es-y-de-donde-proviene-el-hidrogeno>> [Consulta:10/7/2021]
- Wikipedia <energía de gibbs> [en línea] <[https://ca.wikipedia.org/wiki/Energia\\_de\\_Gibbs](https://ca.wikipedia.org/wiki/Energia_de_Gibbs)> [Consulta:15/7/2021]
- Conceptos Teóricos Energía Libre de Gibbs [en línea].  
<[https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10122/Conceptos%20Te%C3%B3ricos\\_Energ%C3%ADa%20Libre%20de%20Gibbs.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10122/Conceptos%20Te%C3%B3ricos_Energ%C3%ADa%20Libre%20de%20Gibbs.pdf?sequence=1&isAllowed=y)> [Consulta: 15/7/21]
- Concepto de energía libre de Gibbs [en línea].  
<<https://www.quimitube.com/videos/termodinamica-teoria-20-concepto-de-energia-libre-de-gibbs/>> [Consulta: 19/7/21]
- Rompiendo la molécula de Agua [en línea]  
<<https://cidta.usal.es/cursos/agua/modulos/Practicas/Electricidad3/hidrolisis.html>> [Consulta:20/7/2021]
- Wikipedia.<Vehículo de hidrógeno>[en línea]  
<[https://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo\\_de\\_hidr%C3%B3geno](https://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo_de_hidr%C3%B3geno)>[Consulta: 24/7/2021]
- Asociación Española del Hidrógeno.<Obtención y aplicaciones del hidrógeno>[en línea]  
<<https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2019/10/2018-01-17-Obtencion-y-aplicacion-es-del-hidrogeno-CENTRO-NACIONAL-DEL-HIDROGENO-fenercom.pdf>> [Consulta:17/8/2021]

- Ucuencia <Cápsula | ¿Sabes qué es y para qué sirve la catálisis?> [en línea].  
<<https://www.ucuenca.edu.ec/component/content/article/233-espanol/investigacion/blog-de-ciencia/1289-quimica?Itemid=437>> [Consulta: 18/8/21]
- Iberdrola. <El hidrógeno verde: una alternativa para reducir las emisiones y cuidar nuestro planeta> [en línea] <<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno-verde>> [Consulta:18/8/2021]
- h2planet<Fuel-Cell Car Science Kit>[en línea]  
<<https://www.h2planet.eu/es/detail/FuelCellCarScienceKit>> [Consulta: 25/8/2021]
- Apilados.<La guerra de los fabricantes de coches por su hueco en la futura automoción de hidrógeno.> [en línea]  
<<http://apilados.com/blog/la-guerra-de-los-fabricantes-de-coches-por-su-hueco-en-la-futura-automocion-de-hidrogeno/>> [Consulta:29/8/2021]
- Driving Eco<¿Cómo funciona el coche de hidrógeno?>[en línea]  
<<https://www.drivingeco.com/como-funciona-coche-hidrogeno/>> [Consulta:2/9/2021]
- Alemania quiere ser líder mundial en hidrógeno. [en línea]  
<<https://felipebenjumeallorete.com/alemania-quiere-ser-lider-mundial-en-hidrogeno/>> [Consulta: 2/9/211]
- ResearchGate. [en línea].  
<[https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-PEM-electrolyzer-cell-for-space-application-Interfacial-resistance-or\\_fig1\\_310327648](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-PEM-electrolyzer-cell-for-space-application-Interfacial-resistance-or_fig1_310327648)> [Consulta: 8/9/21]
- Ariema.<Usos y Aplicaciones del Hidrógeno>[en línea]  
<<https://www.ariema.com/usos-y-aplicaciones-del-hidrogeno>> [Consulta:10/9/2021]
- La vall de l'hidrogen de Catalunya. [en línea] <<https://www.h2valley.cat/>>[Consulta: 22/10/2021]
- YouTube.<Formación de estrellas y elementos.>[en línea]  
<<https://www.youtube.com/watch?v=EuHZRjb-S2o>>[Consulta:11/12/2021]
- YouTube.<A Star is Born | How the Universe Works> [en línea]  
<[https://www.youtube.com/watch?v=mkktE\\_fs4NA](https://www.youtube.com/watch?v=mkktE_fs4NA)> [Consulta:12/12/2021]
- Astroblog.<Por qué somos polvo de estrellas> [en línea]  
<<http://astroblog.cl/por-que-somos-polvo-de-estrellas/>> [Consulta:13/12/2021]
- BBC News.<Hidrógeno verde: 6 países que lideran la producción de una de las "energías del futuro" (y cuál es el único latinoamericano)> [en línea]  
<<https://www.bbc.com/mundo/noticias-56531777>> [Consulta:17/12/2021]
- Good new energy.<¿Para qué utilizaremos el hidrógeno verde, la ya conocida como "energía del futuro"?> [en línea]  
<<https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/para-que-utilizaremos-el-hidrogeno-verde-la-ya-conocida-como-energia-del-futuro/>> [Consulta:18/12/2021]

- FUEL CELLS AND HYDROGEN JOINT UNDERTAKING. [en línia].  
<<https://www.fundacion.valenciaport.com/en/project/fuel-cells-and-hydrogen-joint-undertaking-2/>> [Consulta: 19/12/2021]
- TECPA.<La mayor planta de hidrógeno verde de España>[en línia]  
<<https://www.tecpa.es/hidrogeno-verde/>> [Consulta: 22/12/2021]
- National Geographic.<Pilas de Combustible>[en línia]  
<<https://www.nationalgeographic.es/ciencia/pilas-de-combustible>> [Consulta:22/12/2021]
- Anuario estadístico mundial de energía 2021. [en línia].<<https://datos.enerdata.net/>>  
[Consulta: 24/12/2021]
- amazon.es<CEBEKIT C7110 Kit Coche Hidrogeno, Amarillo>[en línia]  
<[https://www.amazon.es/CEBEKIT-FCJJ-20-Horizon-Hydrocar/dp/B000YQ4IG2/ref=sr\\_1\\_4?dchild=1&keywords=kit+hidrogeno&qid=1624473180&sr=8-4](https://www.amazon.es/CEBEKIT-FCJJ-20-Horizon-Hydrocar/dp/B000YQ4IG2/ref=sr_1_4?dchild=1&keywords=kit+hidrogeno&qid=1624473180&sr=8-4)> [Consulta: 25/12/2021]