Hidrogen, present i futur de l'energia

I.E.S Lluís de Peguera

David Fernández Burriel
Mario Heredero de Pablos
Ignasi Perramon Cerarols

Hidrogen, present i futur de l'energia

David Fernández Burriel
Mario Heredero de Pablos
Ignasi Perramon Cerarols

Tutors: Ramon Tarruella Boixadera
Jaume Pont i Serra

Dimarts 10 de Gener de 2006

ÍNDEX

Glossari **5**
0. Introducció **6**
0.1. Introducció al treball 6
0.2. Motiu del treball 8
0.3. Objectius del treball 8
0.4. Hipòtesis del treball 9
1. L'Hidrogen **10**
1.1. Introducció a hidrogen **11**
1.2. Propietats de l'hidrogen **11**
1.2.1. Propietats i característiques de l'hidrogen 11
1.2.2. Isòtops 12
1.2.3. Formes al·lotròpiques 12
1.3. Obtenció **13**
1.3.1. Introducció 13
1.3.2. Obtenció per fonts d'energia no renovables 13
1.3.3. Obtenció per fonts d'energia renovables 13
1.3.4. Electròlisi 14
1.3.4.1. Els electrolitzadors 14
1.3.4.1.1. Com a dades d'interès de l'electròlisi 14
1.3.4.2. Altres processos d'electròlisi 15
1.3.4.3. Línies d'investigació per millorar l'electròlisi 15
1.4. Emmagatzemament **16**
1.4.1. A gran escala 16
1.4.1.1. Coves sota terra 16
1.4.1.2. Tancs d'emmagatzemament a gran pressió 16
1.4.1.3. Emmagatzament en forma liquida en tancs 17
1.4.2. Per a vehicles 17
1.4.2.1. Hidrogen a pressió 17
1.4.2.2. Hidrogen líquid 18
1.4.2.3. Hidrurs metàl·lics 19
1.4.2.4. Microesferes de vidre 19
1.4.2.5. Materials basats en el carboni 20
1.4.2.5.1. Nanotubs de carboni 20
1.4.2.5.2. Grafit 20
1.4.2.6. Hidrurs químics de barreges 21
1.5. Transport **21**
1.5.1. Transport de l'hidrogen en forma gasosa 21
1.5.2. Transport de l'hidrogen en forma líquida 22
2. Pila de combustible **23**
2.1. Historia **24**
2.2. Principi de Funcionament de les piles de combustible **25**
2.2.1. Funcionament 25
2.2.2. Rendiment 26
2.2.3. Intensitat i voltatge aportats 26
2.2.4. Elements externs que fan variar les característiques de la pila 27
2.3. Pila de combustible polimèriques **27**
2.3.1. Elements de la cel.la 28
2.3.2. Prestacions de la cel.la 30
3. Experimentació amb la pila d'hidrogen **31**
3.1. Descripció dels elements utilitzats **32**
3.2. Experiències **34**

3.2.1. Experiència 1: Caracterització de la corba característica de la cel·la fotoelèctrica i màxima potència ... 34
3.2.2. Experiència 2: Caracterització de la corba característica de l'electrolitzador 37
3.2.3. Experiència 3: Caracterització de la corba característica de la pila ... 41
3.2.4. Experiència 4 : Rendiment de la cel·la fotoelèctrica ... 44
3.2.5. Experiència 5: Eficiència de Faraday (eficiència elèctrica de l'electrolitzador) ... 47
3.2.6. Experiència 6: Rendiment de la pila d'hidrogen ... 51
3.2.7. Experiència 7: Rendiment conjunt Cel·la fotoelèctrica – pila d'hidrogen ... 54
3.2.8. Experiència8: Rendiment conjunt electrolitzador – pila d'hidrogen ... 57
4. Disseny de la maqueta didàctica sobre el funcionament d'una pila d'hidrogen ... 60
5. Valoració de l'energia de l'hidrogen ... 63
6. Conclusió ... 68
7. Agraïments ... 70
8. Llista de referències ... 71
9. Annexos ... 74
A. Annex : L'obtenció de l'hidrogen ... 74
1. Obtenció per fonts d'energia no renovable ... 75
1.1 Reformador del gas natural amb vapor ... 75
1.2 Oxidació parcial dels hidrocarburs ... 75
1.3 Oxidació parcial del carbó ... 75
1.4 Separació del carbó i l'hidrogen d'hidrocarburs ... 75
1.5 Processos reformadors de petita mida i d'oxidació parcial ... 75
2. Obtenció per fonts d'energia renovables ... 76
2.1 Biomassa ... 76
2.1.1 La gasificació i la pirròlisi ... 76
2.1.2 La fermentació ... 76
2.2 La producció biològica ... 76
2.2.1 La Chlamydomonas Reinhardtii ... 76
2.2.2 Les cianobacteries ... 78
2.3 Obtenció mitjançant l'energia eòlica ... 78
2.4 Obtenció mitjançant l'energia solar ... 78
2.5 Cel·la solar fotoelectroquímica (PEC) ... 78
2.6 Taules ... 79
2.7 Avantatges de la producció d'hidrogen ... 81
B. Annex: Emmagatzemament ... 81
1. L'efecte Joule-Thomson ... 81
1.1 L'efecte Joule-Thomson negatiu ... 81
2. Taules ... 82
C. Annex: La seguretat ... 83
1. Taules ... 84
D. Annex: Tipus de piles de combustible ... 87
1. Pila de combustible alcalines ... 87
2. Pila de combustible d'àcid fosfòric ... 88
3. Pila de combustible de carbonats fosos ... 89
4. Pila de combustible d'òxids sòlids ... 90
E. Annex: Projectes sobre la recerca i desenvolupament del món de l'hidrogen ... 91
1. Introducció ... 91
1.1 Projectes de la Unió Europea ... 91
1.2 Projectes de la resta del món ... 93
2. Projectes actuals en l'àmbit de l'automació ... 94
2.1 Funcionament ... 94
2.2.Projectes actual d'hidrogen per als vehicles arreu del món ... 96
F. Equivalents energètics combustibles/hidrogen ... 98

GLOSSARI

Ànode: Pol negatiu d'un elèctrode.
Càtode: Pol positiu d'un elèctrode.
Cèl·lula de combustible: Font de generació d'energia per mitjà electroquímic. Existeixen diferents tipus de cel·les:

AFC (Alkaline Fuel Cells) alcalina
PEMFC/PEM (Proton exchange membrane) membrana d'intercanvi protonic
PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) d'àcid fosfòric
MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) de carbonat fos
SOFC(Solid Oxide Fuel Cell) d'òxid solid
DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) metanol directe

Corrent continu: Electricitat en la qual la intensitat i la tensió es mantenen constants.
Electròlit: Substància que permet l'intercanvi d'electrons entre substàncies en presència d'energia elèctrica.
Electròlisi: Procés químic pel qual, fent passar corrent elèctric a través d'una solució es transfereixen electrons cap a l'elèctrode positiu.
Electrolitzador: Element que produeix hidrogen i oxigen per electròlisi de l'aigua aplicant-hi un corrent continu amb un mínim de 1,23 volts.
Electroquímic: Sistema de conversió de l'energia química en energia elèctrica.
Energia eòlica: És l'energia produïda pel vent.
Energia fotovoltaica: Converteix directament l'energia del sol en electricitat utilitzant la capacitat que tenen alguns minerals (com els cristalls de silici) per realitzar aquesta transformació. Les cel·les fotovoltaiques converteixen la llum en corrent (elèctric) continu.
Energia renovable: Classes d'energia que es regeneren de manera natural i que són pràcticament inesgotables en el temps (biomassa, eòlica, solar, hidràulica, geotèrmica, oceànica).
Fermentació: És la conversió de material orgànic des d'una forma química a un altre utilitzant enzims produïts pels microorganismes vius. Alguns requereixen oxigen (aeròbics), altres no el requereixen (anaeròbics) i alguns poden continuar operant després que l'oxigen s'esgoti (anaeròbics facultatius).
Ionització: Procés que fa perdre o guanyar electrons per formar ions positius o negatius.
Hidrogen: Element químic que conte un protó i un electró. És un gas incolor inodor, insípid, altament inflamable i no és tòxic.
kWh: Unitat d'energia equivalent a 3600 Joules.
MEA: Conjunt elèctrode membrana (Membrane Electrode Assembly – MEA), de 1mm d'espessor. Es situa al cor de la pila de combustible i consisteix en una membrana polimèrica conductora d'ions, recoberta d'elèctrodes plans amb capes interposades de catalitzador de platí i que incorpora una fulla de paper carbó o una tela de fibra de carbó formant capes de difusió de gasos.
Membrana: Substància que permet el pas d'una substància i n'impedeix el pas d'altres.
Nm^3: Metre cúbic en condicions normals ($1{,}013 \times 10^5$ Pa i 25ºC)
Oxidació: Procés químic que aporta electrons.
Pila de combustible: Unió de cel·les de combustible en sèrie per a produir tensions més elevades.
Piròlisi: És un procés tradicional que consisteix en l'escalfament de la biomassa entre 200ºC a 500ºC per la recuperació del material volàtil, així com la obtenció del residu carbonitzat.
Polímer: Substància, sintètica o natural, composta de molècules simples repetides i enllaçades entre elles.
Reducció: Procés químic que produeix absorció d'electrons.
Rendiment: Relació de proporcionalitat establerta entre l'efecte útil obtingut en una màquina, en un mecanisme, en una instal·lació, etc, i l'energia consumida per a obtenir-lo, entre l'efecte obtingut realment i el calculat teòricament, etc.
Voltatge: Mesura del potencial elèctric en un circuit.

0. INTRODUCCIÓ

0.1 Introducció

El concepte "energia"

Les estrelles brillen, el sol escalfa, la terra gira, un volcà erupciona, els peixos neden, els ocells volen, els animals corren, l'home treballa, les màquines funcionen i la societat progressa. En totes aquestes activitats s'utilitza energia.

L'energia és una magnitud física que associem amb la capacitat que té la matèria per a produir treball mecànic, emetre llum o generar calor. En totes aquestes manifestacions hi ha una característica comuna anomenada energia, que és pròpia de cada sistema material, depèn de l'estat físic i químic en un moment determinat i varia quan aquest estat es modifica.

Per la Física, l'energia és un dels conceptes bàsics que poden manifestar-se de diverses maneres, potencial, cinètica, química, elèctrica, magnètica, nuclear, radiant, etc. Aquestes poden transformar-se entre sí però respectant sempre el principi de conservació d'energia. Per tant, en l'univers no pot existir creació o desaparició d'energia, sinó transferència d'un sistema a un altre o transformació d'energia d'una forma a una altra. Així les plantes, per mitja, de la fotosíntesi, són capaces d'utilitzar una petita part de l'energia del Sol transformant-la en energia química. La resta d'éssers vius l'utilitzen per a obtenir altres tipus d'energia, cinètica, química, calorífica, luminiscent. Les restes orgàniques emmagatzemades al llarg de milions d'anys – carbó, petroli i gas-, mantenen part d'aquesta energia química, que per mitjà de la combustió s'allibera, convertint-se en energia mecànica química o electromagnètica.

En tots aquestes processos de transformació de l'energia es guanya entropia amb la qual cosa els productes perden capacitat de generar treball útil. L'energia d'un sistema es manté constant, però no l'entropia. Un barril de petroli és un magatzem d'energia de baixa entropia. Els productes que resulten de la seva combustió augmenta el seu estat d'entropia. En aquest exemple de sistema tancat, l'increment de l'entropia té com a conseqüència un augment de l'homogeneïtat. Succeeix un fet semblant als organismes vius. Aquests estan contínuament important i exportant energia, mantenint-se en estats de desequilibri químic i termodinàmic, en definitiva, augmentant la seva heterogeneïtat i complexitat desafiant l'entropia.

Que està passant?

Al llarg de la història de la humanitat els éssers humans hem necessitat energia per fer-nos més fàcil la vida. A mesura que la civilització i la nostra tecnologia ha anat evolucionant, hem obtingut l'energia que necessitàvem de fonts diferents, però totes amb un punt en comú, el carboni. Primer, en els temps de caçador-recol·lector, mitjançant la recol·lecció i aprofitament de l'energia química de les plantes i animals; després, amb la combustió de la llenya, obteníem energia calorífica per escalfar-nos o cuinar; més tard, al segle XIX el carbó va esdevenir font d'energia amb la revolució industrial i al segle XX el petroli va desplaçar el carbó com a principal font d'energia.

Com hem dit abans, tots aquests processos, basats en la combustió, estan abocant a l'atmosfera milions de quilograms de carboni en un període relativament curt, si el comparem amb el temps que ha passat des que les restes orgàniques es convertissin en carbó, petroli o gas. Aquests processos d'alta entropia estan desequilibrant el fràgil sistema de la Terra i ens estan abocant a una acceleració del procés conegut com a canvi climàtic. En l'actualitat ens trobem en un moment de greu crisi energètica mundial. Les fonts dels recursos fòssils ens porten a una perillosa crisi climàtica; la propera escassetat d'aquests recursos ens està portant i ens portarà a guerres i a crisis econòmiques inimaginables.

L'ús de les energies renovables tot just està començant i en aquest moment es plantegen com l'única via per poder fugir d'aquest embut. Entre aquestes, la utilització de l'hidrogen sorgeix com una de les alternatives, ateses les seves característiques, per al transport i aprofitament de l'energia. No es pot considerar l'hidrogen com una energia renovable, si no com un vector energètic, que ens permet i permetrà transportar l'energia per a l'aprofitament en vehicles o per a necessitats domèstiques i industrials. L'hidrogen és un vector renovable, ja que la terra està coberta d'aigua en un 75%, però només serà una alternativa neta quan es comencin a generalitzar formes d'obtenció que no es basin en reformacions dels hidrocarburs, com l'electròlisi a partir de fonts energètiques renovables.

El treball

Aquest treball tracta sobre l'energia de l'hidrogen i una de les formes d'aprofitament de la seva energia, com són les piles de combustible. Volem presentar un resum de l'estat de l'hidrogen en l'actualitat. Primerament veurem les propietats d'aquest element, sistemes d'obtenció, transport, emmagatzemament. Seguidament veurem els sistemes d'aprofitament de l'energia de l'hidrogen basats en piles d'hidrogen. Aquí farem una descripció del seu funcionament en general, una citació del tipus de pila que hem utilitzat a les experiències i en l'annex inclourem els altres tipus de pila.

Finalment, hem fet un estudi detallat sobre un sistema de producció, basat en un electrolitzador, una cel·la fotoelèctrica, i un sistema d'aprofitament d'energia de l'hidrogen, basat en una pila d'hidrogen PEM (Proton Exchange Membrane). Aquest sistema ha estat proporcionat per l'institut Lluís de Peguera i el camp d'aprenentatge de la Casa de la Culla. Mitjançant les pràctiques realitzades per obtenir dades com el rendiment de tots els elements, la corba característica, hem pogut tenir un primer contacte amb aquesta energia que hem estat estudiant de manera teòrica. Utilitzant tots els coneixements adquirits hem dissenyat una maqueta didàctica del procés d'obtenció, aprofitament i utilització de l'energia de l'hidrogen que serà utilitzada en el camp d'aprenentatge de la Casa de la Culla.

Per comprendre de quina manera evolucionaran aquests sistemes i quin impacte tindran en la nostra vida, en l'annex inclourem un resum de les principals vies d'investigació i projectes relacionats amb l'hidrogen que estan duent a terme la Unió Europea i la resta del món. També hi hem afegit els projectes que duen a terme les empreses automobilístiques, ja que pensem que és un sector on l'hidrogen causarà un gran impacte als propers anys. A l'annex també s'hi pot trobar informació complementaria referent als altres apartats del treball.

0.2 Motiu del treball

El que ens ha impulsat a realitzar un estudi sobre aquest tema de l'hidrogen i les piles de combustible, ha estat el nostre interès per les noves maneres renovables de generar i transportar energia i també el fet d'haver estudiat durant el curs el funcionament de les cel·les fotoelèctriques i les energies renovables i no renovables. Pensem que aquests fets ens poden ajudar a la recerca i argumentació del treball.

0.3 Objectius del treball

Els objectius del nostre treball són:

1.- Obtenir una visió general de l'estat d'aquest nou sistema de transport, com és l'hidrogen, principalment centrant-nos ens els aspectes relacionats amb l'anàlisi de les propietats de l'element, els sistemes d'obtenció, l'emmagatzemament, el transport i la seguretat.

2.- Comprendre els diversos mitjans d'aprofitament de l'energia de l'hidrogen i veure els sistemes que utilitzen. Comprendre el funcionament en general de les piles de combustibles, i en concret de la nostra.

3.- Obtenir una visió de les línies d'investigació i dels projectes que s'estan desenvolupant a Europa i a la resta del món .

4.- Fer funcionar correctament la pila d'hidrogen i estudiar el seu comportament a canvis de temperatura, de lluminositat pel que fa a la cel·la i estudiar els rendiments del diferents dispositius que conte la pila.

5.- Dissenyar una maqueta didàctica que s'utilitzarà a la casa de la Culla, on es pugui veure la pila a ple rendiment, i com es pot aprofitar l'energia que s'obté.

Els objectius següents deriven dels objectius 4 i 5, i tenen relació amb la utilització de sistema de pila de combustible 13012, de la marca Heliocèntris proporcionat pel camp d'aprenentatge del Bages, Casa de la Culla.

1.- Aconseguir que la pila funcioni sense interrupcions i a ple rendiment.

2.- Estudiar les possibles aplicacions de la pila segons el voltatge que s'obté i formes d'obtenció de l'hidrogen.

3.- Canviar la intensitat de la llum de la placa i diferents plaques per tal de fer un estudi de rendiments segons les condicions.

4.- Estudi de les condicions necessàries per poder fer anar amb la màxima potència tant la pila com la placa i el molí.

0.4 Hipòtesis sobre el treball

En aquest treball hi ha moltes incògnites sobre el funcionament i el resultat del de la pila. Per aquest motiu, al començament del treball, tenim una sèrie d'hipòtesis i preguntes que un cop acabada la recerca es podran contestar amb resultats.

1.- L'hidrogen és un recurs viable per a formar part de la solució al problema de les energies.

2.- Es creu que encara queda molt per treballar perquè l'hidrogen formi part del conjunt d'energies que fan moure el nostre planeta.

3.- El rendiment del sistema de pila de combustible d'hidrogen que estudiarem no serà gaire alt.

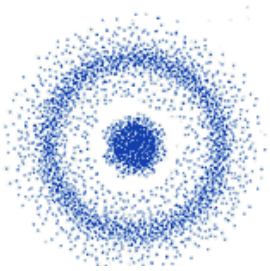
4.- En un futur la gran majoria de cotxes utilitzarà piles d'hidrogen com a font d'energia.

5.- Queden molts anys perquè es faci real la incorporació de l'hidrogen a la nostra vida quotidiana.

1.L'Hidrogen

1.1 INTRODUCCIÓ A L'HIDROGEN

L'**hidrogen** (del llatí: *Hydrogenium*) és un element químic amb símbol H i nombre atòmic 1. Forma un gas diatòmic (H_2) inodor, incolor i altament inflamable amb la presència de l'oxigen. És l'element més lleuger i el més abundant en l'univers, atès que es troba en quantitats massives en les estrelles. Pot reaccionar amb la majoria d'elements, forma part de l'aigua i de la major part de compostos orgànics. Industrialment, s'utilitza en la producció d'amoníac, com a gas lleuger en aerostàtica i recentment en cel·les de combustible d'hidrogen.



Atom d'hidrogen
(Font: www.webelements.com)

1.2 PROPIETATS DE L'HIDROGEN

1.2.1 Propietats i característiques de l'hidrogen

General	
Nom, Símbol, Número	Hidrogen, H, 1
Sèrie química	No metall
Grup, Període, Bloc	1 (VIA), 1, s
Densitat, Duresa Mohs	0,089Kg/m^3, NA
Aparença	incolor
Propietats atòmiques	
Pes atòmic	1,00794 uma
Radi atòmic	25 (53) pm
Radi covalent	37 pm
Radi de Van der Waals	120 pm
Configuració electrònica	1s^1
Estat d'oxidació (Òxid)	1 (amfòter)
Estructura cristal·lina	Hexagonal
Propietats físiques	
Punt de fusió	14,025 K
Punt d'ebullició	20,268 K (-182.82 ºC)
Volum molar	17,36 $\times 10^{-3}$ m^3/mol
Entalpia de vaporització	0,44936kJ/mol
Entalpia de fusió	0,05868 kJ/mol
Pressió de vapor	209 Pa a 23 K
Velocitat del so	1270 m/s a 298,15 K
Informació diversa	
Electronegativitat	2,2 (Escala de Pauling)
Capacitat calorífica esp.	14304 J/(Kg*K)
Conductivitat elèctrica	Sense dades
Conductivitat tèrmica	0,1815 W/(m*K)
Potencial d'ionització	1312kJ/mol
Valors en el SI d'unitats i en CNPT (0º C i 1 atm) excepte quan s'indica el contrari.	

1.2.2 Isòtops

L'hidrogen és l'únic element que té noms, i símbols químics, diferents per als seus isòtops.

- Protí: és l'isòtop més comú de l'hidrogen, el seu nucli atòmic conté un protó i cap neutró.
- Deuteri (D): el seu nucli atòmic, conté un protó i un neutró. El deuteri té una abundància natural compresa entre 0,0184 i el 0,0082% (IUPAC)
- Triti (T): el seu nucli atòmic conté un protó i dos neutrons. És radioactiu.

Isòtops més estables					
isòtop	%	Període de semidesintegració	CD	ED- MeV	PD
^{1}H	99.985%	H és estable amb 0 neutrons			
^{2}H	0,015%	H és estable amb 1 neutrons			
^{3}H	Sintètic	12,33 Anys	β^-	0,019	^{3}He
^{4}H	Sintètic	Desconegut	n	2,910	^{3}H
Valors en el SI d'unitats i en CNPT (0º C i 1 atm) excepte quan s'indica el contrari.					

1.2.3 Formes al·lotròpiques

En condicions normals, el gas hidrogen és una mescla de dos tipus diferents en funció de l'spin dels seus electrons i nuclis. Aquestes formes es coneixen com a orto- i para-hidrogen. L'hidrogen normal està compost per un 25% de la forma para- i un 75% de la forma orto-, la considerada "normal", encara que no pugui obtenir-se en estat pur. Ambdues formes tenen energies lleugerament diferents, la qual cosa provoca que les seves propietats físiques no siguin idèntiques.

A pressions molt elevades pren la forma d'hidrogen metàl·lic. Es creu que el nucli del planeta Júpiter estaria format per aquesta mena d'hidrogen.

1.3 OBTENCIÓ

1.3.1 Introducció

L'hidrogen és l'element més abundant, constituint el 75% de la massa i el 90% dels àtoms de l'univers. Es troba en abundància en les estrelles i en els planetes gegants gasosos (com ara Júpiter); per contra, a l'atmosfera terrestre es troba només en una proporció d'1 ppm en volum. L'hidrogen s'obté de diverses formes de les quals destaquen les següents:

1.3.2 Obtenció de l'hidrogen provinent de fonts d'energia no renovables

El **reformador** és un component de les piles de combustible que extreu l'hidrogen dels hidrocarburs combustibles, mitjançant un catalitzador. Consisteix en un dipòsit dintre del qual el gas combustible (hidrocarbur) i altres fluxos de reciclatges de gas (si hi són presents) reaccionen amb el vapor d'aigua, a través d'un catalitzador per produir un gas ric en hidrogen (H_2), que s'usarà en la pila de combustible. Els productes de la sortida del reformador són una barreja de H_2, CO, CO_2 i també N_2, en cas que s'utilitzi una oxidació parcial amb aire. La concentració de CO és troba entre 1 – 20% depenent de la temperatura. La pila de combustible PEMFC *(Proton exchange membrana fuel cell)* no admet el CO, ja que aquest desactivaria el catalitzador de platí; per això la seva concentració s'ha de reduir a 10 – 100 ppm. Per realitza-ho s'aplica un procés de substitució en el qual el CO i l'aigua es converteixen en CO_2.

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2$$

La reacció **d'oxidació selectiva** utilitza un catalitzador adequat i un control de temperatura per assegurar que la reacció d'oxidació del CO s'anteposi a la de l'oxigen amb l'hidrogen.

$$CO + 1/2O_2 = CO_2$$

En el cas que no s'efectuï correctament, la temperatura del reactor augmenta ràpidament, cosa que afavoreix la reacció de substitució inversa i, com a resultat, la concentració de CO augmenta en lloc de disminuir.

Per a complementar la informació donada es pot consultar l'annex A apartat 1

1.3.3 Obtenció de l'hidrogen provinent de fonts d'energia renovables

L'energia renovable, sigui biomassa, eòlica, solar, geotèrmica, oceànica, i en particular hidràulica, està destinada a produir electricitat i alimentar la xarxa elèctrica. No obstant, alguns casos , quan la font d'energia renovable està allunyada de la xarxa (eòlica, solar, geotèrmica i oceànica), interessa produir localment hidrogen mitjançant electrolitzadors, i després usar-lo o transportar-lo a distància per mitjà de canonades o vaixells. Existeixen altres fonts basades en la biomassa (gasificació, pirolisi i fermentació) en la producció biològica (algues i cianobacteries).

Per a complementar la informació donada es pot consultar l'annex A apartat 2

1.3.4 Electròlisi

L'electròlisi convencional de l'aigua s'utilitza comercialment des de fa 90 anys. En els anys 80 es produïa només del 0,1% al 0,2% de la producció mundial de l'hidrogen, obtenint l'electricitat de les centrals hidràuliques. El procés només es pot aplicar per raons econòmiques en llocs on la generació hidràulica d'electricitat sigui abundant i molt barata (Egipte, Brasil, Canadà, Noruega) o disposin d'energia sobrant com en les centrals nuclears (França, Bèlgica, Suïssa). L'electròlisi de 1 mol d'aigua produeix 1 mol d'hidrogen gas i mig mol d'oxigen gas. Les condicions del procés són pressió atmosfèrica i 25ºC (298º K) i l'energia necessària és la de dissociació més la d'expansió dels gasos.

$$H_2O = H_2 + \frac{1}{2} O_2$$

1.3.4.1 Els electrolitzadors

Els electrolitzadors produeixen hidrogen per electròlisi de l'aigua i l'energia requerida pot ser obtinguda també de les energies renovables, en particular l'eòlica, la solar i l'oceànica que poden dedicar-se exclusivament a la producció d'hidrogen, que després per mitjans adequats de transport arribarà al punts de consum. Encara que el procés de l'electròlisi consumeix una part de l'energia produïda, l'hidrogen pot emmagatzemar-se en dipòsits de manera que s'aprofita l'energia existent a les hores de màxima intensitat del vent o de màxima radiació solar o de màxim onatge, que d'una altra forma s'haurien desaprofitat. En l'electròlisi, l'hidrogen es produeix en l'elèctrode negatiu (càtode) i l'oxigen en el positiu (ànode) i, per mantenir els gasos separats, les dues àrees de reacció disposen d'un diafragma que separa els ions conductors.

1.3.4.1.1 Com a dades d'interès de l'electròlisi:

Un electrolitzador de 1 kW produeix 170l/hora de H_2 I 85 l/hora de O_2 en condicions normals de pressió i temperatura, de manera que es necessiten 5,9 hores per obtenir un m^3 d'H_2 i per tant, l'energia utilitzada és de 5,9 kWh amb un rendiment del 51% (el rendiment del 100% correspon a l'ús teòric de 3 kwh/m^3 de H_2).

L'electròlisi de 1 Tm d'aigua proporciona 111,5 Kg de H_2 (1,237 m^3) i 888 Kg de O_2 (679 m^3). Per millorar el rendiment poden ser utilitzats electròlits polimèrics i altes temperatures (700- 900ºC) en un procés anomenat electròlisi de vapor d'aigua supercrític. Els electrolitzadors alcalins utilitzen un electròlit, usualment una solució d'hidròxid potàssic al 25%. El rendiment de l'operació d'electròlisi arriba al 80% utilitzant una energia de 4,5 kWh/m^3 H_2.

Alguns electrolitzadors treballen a la pressió de 30 bar amb el que poden subministra directament l'hidrogen a les estacions de servei, utilitzant 4,90 kWh/m^3 per generar 1-3 m^3/h de H_2 amb una puresa del 99,997%. Altres electrolitzadors aptes per petites plantes utilitzen membranes polimèriques (PEM) com electròlit, i poden arribar a un rendiment teòric del 94%.

La puresa de l'hidrogen obtingut directament de l'electrolitzador atmosfèric o del d'alta pressió, és del 9,9% ± 0,1% i després d'un procés de purificació arriba a 99,9998%.

1.3.4.2 Altres processos d'electròlisi

- **Electròlisi a alta pressió** de 5MPa (50 bar), sent el cost de 1000 – 1250 €/kW.
- **Electròlisi a alta temperatura,** cosa que permet un baix consum elèctric ja que s'ha aportat la resta d'energia amb calor a alta temperatura. Es troba en fase d'investigació.

1.3.4.3 Línies d'investigació per millorar l'electròlisi:

- **Electròlisi d'alta pressió** que permeti l'emmagatzemat del H_2 a alta pressió.
- **Integració compacta** de l'electrolitzador amb la pila de combustible.
- **Normalització de la tecnologia**, en particular la tensió d'electrolitzador i la de la pila de combustible.

Per a complementar la informació donada es pot consultar les experiència 2 i 5 en l'apartat d'experimentació amb la pila de d'hidrogen.

1.4 EMMAGATZEMATGE DE L'HIDROGEN

L'hidrogen necessari per al funcionament de la pila de combustible pot ser emmagatzemat de maneres diferents:

Tancs a pressió (700 bar), contenidors a baixa pressió, en forma líquida a temperatura molt baixa (21º K, - 250º C), en hidrurs, en nanotubs o poden fabricar-se localment per reforma d'un altre combustible, per exemple, metanol, o per electròlisi (electrolitzador).

1.4.1 Emmagatzematge a gran escala

En qualsevol sistema de distribució de l'hidrogen en grans quantitats s'ha de resoldre el problema de l'emmagatzematge per proporcionar un punt intermig entre les facilitats de producció i les fluctuacions de la demanda. La tècnica que permeti un emmagatzematge eficient a gran escala i amb un baix cost és l'objectiu principal a aconseguir. Una possible opció és l'emmagatzematge en forma de gas a pressió o de forma líquida (amb el seu sistema de manteniment de la temperatura).

1.4.1.1 Coves sota terra

Una de les moltes opcions estudiades per emmagatzemar hidrogen gasós és la utilització de coves sota terra i de formacions de gas natural esgotades sota el sòl. Encara que l'hidrogen té una major tendència a escapar-se que la majoria de gasos, s'ha demostrat que les fugues no suposen un problema per a aquestes tècniques. Per exemple, el gas ciutat (barreja que conté hidrogen) ha estat emmagatzemat amb èxit en una cova de França, i l'heli que té més tendència a escapar-se, fins i tot que l'hidrogen, ha estat emmagatzemat en un camp esgotat de gas natural prop d'Amarillo, Texas. No obstant, l'energia consumida en introduir i extreure el gas en aquestes instal·lacions d'emmagatzemat pot ser significativa.

1.4.1.2 Tancs d'emmagatzematge a gran pressió a la superfície

Els tancs d'emmagatzematge a gran pressió a la superfície poden ser un altre opció. Es pot emmagatzemar una certa quantitat de gas mitjançant modestos canvis de pressió al sistema de distribució de gasoductes. En el cas del gas natural, aquesta tècnica s'utilitza per ajudar a administrar les fluctuacions transitòries de demanda, com els pics al matí i a la nit en la demanda residencial de les àrees urbanes. Encara que la mateixa tècnica pot tenir èxit per l'hidrogen, el seu potencial està limitat, particularment si l'hidrogen es produeix a partir de fonts intermitents com la solar o l'eòlica.

Tanc d'hidrogen a California
(Font: www.evworld.com)

1.4.1.3 Emmagatzematge en forma liquida en tancs

El Centre Espacial Kennedy utilitza una esfera de 850.000 galons (3.217.600,03 litres) prop de la plataforma de llançament que pot transvasar des del tanc a la llançadora espacial més de 10.000 galons (37.854,118 litres) per minut. L'emmagatzamament en plantes que produeixen l'hidrogen líquid es fa en tancs esfèrics aïllats al buit que usualment contenen prop de 400.000 galons (1.514.164,72 litres). L'energia necessària per a la liqüefacció pot no ser un obstacle, si és necessari l'hidrogen en forma líquida per a la utilització final.

Tanc d'hidrogen líquid al Centre Espacial Kennedy (Florida)
(Font: www.911dispatch.com)

1.4.2 Emmagatzematge en vehicles

L'emmagatzematge d'hidrogen suficient en un vehicle per a aconseguir una autonomia de 500 quilometres és un repte important. Referent al pes, l'hidrogen té gairebé més de tres vegades l'energia continguda a la gasolina.

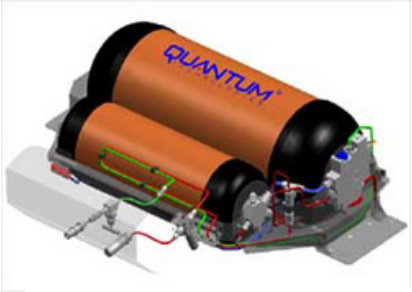
Energia per unitat de massa	
Gasolina	44 MJ/kg
Hidrogen	120 MJ/kg

No obstant, en volum la situació és capgira.

Energia per unitat de volum	
Gasolina	32 MJ/l
Hidrogen	8 MJ/l

1.4.2.1 Hidrogen a pressió.

La densitat d'energia de l'hidrogen gasós es pot millorar utilitzant altes pressions. És necessària una millora en els materials i en els dissenys per a assegurar la integritat dels tancs. També es requereixen millores en l'eficiència i la reducció del cost de producció a altes pressions de l'hidrogen.



Tanc d'hidrogen a pressió de l'empressa Quantum
(Font: www.eere.energy.gov)

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

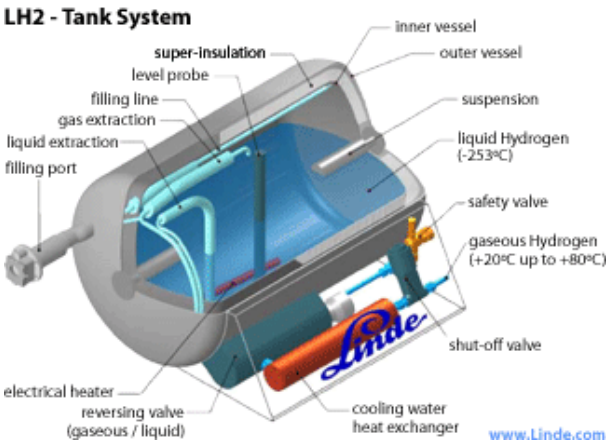
La relació entre la massa del gas emmagatzemat i la massa del contenidor és del 5%, arribant al 10% si substituïm la fulla metàl·lica per un material polimèric multicapa. Existeixen ampolles que guarden hidrogen a 70 MPa (700 bars) i 35 MPa (350 bars). Des del punt de vista de seguretat, s'han desenvolupat proves de resistència a l'impacte dels dipòsits i s'ha incorporat un regulador de pressió i un sensor de temperatura que permet controlar les variacions de temperatura en el procés d'omplerta dels tancs.

La capacitat i, per tant, l'autonomia dels vehicles en l'àmbit de l'hidrogen a pressió és pot augmentar confinant l'hidrogen a més pressió. Aquest fet provoca un augment de cost que el fa inviable. Per això, l'augment de la pressió, la baixada del cost, el mètode de reomplerta i el control de la calor es plantegen com els reptes que han de ser millorats per fer viable uns possibles i probables vehicles d'hidrogen. Actualment, s'està investigant sobre diferents mètodes de confinament de l'hidrogen que permetrien millorar el cost i la capacitat amb el mateix volum:

- **Fibra de carboni menys costosa:** S'estan investigant nous tipus de fibra de carboni que permetrien reduir costos i augmentar la capacitat i com a conseqüència l'augment de l'autonomia dels vehicles.
- **Cryo-comprimit:** Es troba en procés de desenvolupament un nou sistema per comprimir gasos a baixa temperatura. Basant-se en la característica dels gasos, que amb una pressió i volum fixa la capacitat d'un recipient augmenta quan la temperatura baixa. Aquesta millora s'obtindria refrigerant el tanc amb nitrogen líquid a -195,8 ºC (77,2 K).

1.4.2.2 Hidrogen líquid

La liqüefacció de l'hidrogen gas necessita de molta energia, al voltant de 21 a 25 kWh per cada kg d'hidrogen líquid produït, el qual equival aproximadament a la meitat del poder calorífic del propi hidrogen. La tècnica es basa inicialment un procés de refredament, anomenat Claude, amb nitrogen líquid a -196ºC per refredar l'hidrogen gas comprimit, i és refrigera després mitjançant un procés d'expansió Joule–Thomson fins a una temperatura de -253ºC. Posteriorment l'hidrogen líquid és emmagatzemat a pressió de 0,6 – 1 MPa (6 – 10 bar) i a una temperatura de -248ºC. En aquestes condicions es perd diàriament per evaporació entre el 0,5% i l'1% del volum d'hidrogen líquid emmagatzemat. L'hidrogen líquid s'utilitza bàsicament per a la indústria espacial. La primera liqüefacció de l'hidrogen, la va desenvolupar James Dewar al 1898.



Tanc d'hidrogen licuad de l'empresa Linde
(Font: www.Lind .com)

Per a complementar la informació donada es pot consultar l'annex B apartat 1.

1.4.2.3 Hidrurs metàl·lics

Els hidrurs metàl·lics, com els compostos FeTi, constitueixen una forma ideal d'emmagatzematge a pressió de 6 – 10 atmosferes i alliberen lentament l'hidrogen en un procés endotèrmic, en escalfar-se suaument. En aquest procés, conegut des de fa 35 anys, els àtoms d'hidrogen emigren a la superfície de l'hidrur metàl·lic, es combinen entre si formant molècules d'hidrogen i escapen en forma d'hidrogen gas. Aquest mecanisme d'emmagatzematge és doncs reversible, estable i segur. La quantitat total de H_2 absorbit és el 1% - 2% del pes total del dipòsit, però aquest percentatge passa al 5% - 7% a temperatures superiors a 250 ºC.

Els treballs d'investigació que es realitzen en aquest camp tenen com a objectiu una nova classe d'hidrurs metàl·lics alcalins, dopats amb un catalitzador com el TiCl (clorur de Titani), que millori la cinètica de sortida de 'hidrogen molecular" convertint-lo en un procés reversible, en condicions de pressió i temperatura moderades. El material investigat és el sistema d'hidrur d'alumini (AlH_{4-X}), on x és qualsevol metall alcalí (Na, Li, Mg, o Zr), lleuger, que emmagatzema al voltant del 5% en pes d'hidrogen i que s'allibera a temperatures inferiors als 200ºC.

Una ampolla d'hidrur metàl·lic de 30 l de capacitat de H_2 té un cos d'uns 600€. Les característica d'aquests sistemes que es volen millorar són:

- Estabilitat
- Alta capacitat d'absorció,
- Rapidesa d'absorció/alliberació
- Baix cost
- Llarga vida útil (1.000 cicles de carrega)
- Temperatura de treball ambiental (nominal 25º) que garantitzi la integritat del contenidor i l'absència de fugues.
- Bona resistència a les impureses de l'hidrogen.

Per a complementar la informació donada es pot consulatar una taula sobre les característiques dels diferents hidrurs metàl.lics que s'indica a l'annex B apartat 2

1.4.2.4 Microesferes de vidre

Una altra tècnica, en procés d'investigació, utilitza microesferes de vidre des d'1 mm fins a 25 micres de diàmetre i poques micres de gruix (1 µm = 10^{-6} m), que s'omplen amb el gas a alta temperatura que va des de 200ºC a 400ºC. Les altes temperatures provoquen una permeabilitat a les parets de vidre, que permeten que el gas ompli les esferes. Un cop el vidre s'ha refredat a temperatura ambient, l'hidrogen queda atrapat dins les esferes.

L'alliberació de gas es realitza per escalfament o trencament del vidre. Així es redueix el risc d'explosió ja que l'hidrogen es troba distribuït en milions de microesferes que emmagatzemen el gas.

1.4.2.5 Materials basats en el carboni

Aquesta categoria de materials engloba totes les tecnologies d'emmagatzematge basades en el carboni, com els nanotubs o el grafit .

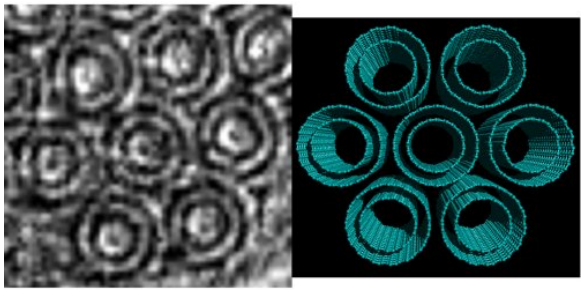
1.4.2.5.1 Nanotubs de carboni

El 1991, el científic japonès Sumio Lijima va descobrir els nanotubs de carboni, que són tubs microscòpics de carboni, d'una mida aproximadament de la billonèsima part d'un metre, que emmagatzemen l'hidrogen en els tubs o en les seves estructures. El mecanisme d'emmagatzemament-alliberació del H_2 és semblant al dels hidrurs metàl·lics, però pot emmagatzemar un major percentatge del seu pes en hidrogen, entre el 4,2% i el 65%.

Alguns resultats han mostrat que, mentre l'emmagatzematge d'hidrogen és relativament baix en nanotubs d'una sola parets, un emmagatzematge superior ha estat mesurat en nanotubs dopats amb metalls a temperatura ambient.

Durant els pròxims anys s'haurà de millorar la capacitat d'absorció-alliberació de l'hidrogen, la capacitat d'emmagatzemament, el volum i millorar el procés de fabricació per tal que els costos siguin rebaixats amb la qual cosa es podrà aconseguir una viabilitat econòmica.

S'ha presentat una nova alternativa per part de la Universitat de Shinshu, IPICYT, Mèxic i l'institut tecnològic de Massachusetts als E.E.U.U. Aquestes institucions acaben de constituir els primers nanotubs de 2 capes amb propietats, segons asseguren, superiors als nanotubs d'una sola capa.



Nanotubs de doble capa
(Font: http://www.euroresidentes.com)

1.4.2.5.2 Grafit

S'ha proposat per part de científics de Canadà i Alemanya, una nova tècnica d'emmagatzemat d'hidrogen . El mètode es basa en l'emmagatzematge del gas entre l'espai que separa dues làmines de grafit, només separades per uns quants nanòmetres. El grafit pot emmagatzemar millor l'hidrogen que altres materials, com nanotubs de carboni, i entre els habitatges que presenta destaquen que és barat, no tòxic i fàcil de preparar.

Per a complementar la informació donada es pot consulatar una comparació entre els sitemes d'emmagatzemament d'hidrogen a pressió, hidrurs metàl.lics i nanotubs de carboni que s'indica a l'annex B apartat 2.

1.4.2.6 Hidrurs químics de barreges

Els hidrurs químics de barreges es presenten com una alternativa a l'emmagatzematge directe de l'hidrogen. Consisteixen en una bateria amb aliatge d'hidrurs metàl·lics de níquel que formen l'elèctrode negatiu, i que és activat amb hidrogen durant la càrrega, i és desactivada a la descàrrega alliberant l'hidrogen.

El nombre de càrregues i descàrregues causa una degradació (decrepitació) que debilita l'estructura sòlida de l'aliatge i la trenca. El límit és de 500 cicles de càrrega-descàrrega a la capacitat nominal de la cel·la (taxa de descarrega que buida la cel·la en 5 hores).

L'hidrogen s'uneix químicament a la massa líquida alcalina i es gasta en la reacció produint hidrurs químics que es comporten com a mitjans secundaris d'emmagatzematge. Per exemple, els borats $NaBO_2$ i $Na_2B_4O_7$ emmagatzemen hidrogen en forma de l'hidrur $NaBH_4$. La massa líquida protegeix l'hidrur del contacte anticipat amb la humitat i permet el bombeig. És possible, teòricament, arribar fins al 10% d'emmagatzematge en pes. És necessari regenerar l'hidrur gastat en un reactor d'alta temperatura.

1.5 TRANSPORT

El transport de l'hidrogen igual que altres compostos depenen principalment de l'estat físic en què es troben en el moment de transport.

El transport ha d'avançar paral·lelament amb les tècniques d'emmagatzement descrites en l'apartat anterior. Hi ha diverses formes de realitzar el transport, es pot fer per vies marítimes, o terrestre (camions, trens, tubs); tot depèn de si l'hidrogen es vol transportar en estat sòlid o gasos, o també mitjançant fluids criogènics.

1.5.1 Transport de l'hidrogen en forma gasosa

El transport de l'hidrogen en forma gasosa s'ha de fer mitjançant gasoductes o tubs ja que, introduint-lo a pressió dins un dipòsit, no és competitiu a causa a la baixa densitat del gas i l'alt cost dels recipients a pressió.

Pel que fa al transport mitjançant els tubs, el sistema seria semblant al gas natural amb alguns canvis pel que fa al diàmetre dels tubs, nivell de pressió i distàncies entre les estacions de compressió a causa de les propietats físiques i químiques de l'hidrogen gasós. El problema d'aquest sistema de transport no és la compressió de l'hidrogen encara que s'hauria de modificar el disseny dels tubs, sinó les necessitats de capacitat, pressions operatives, relació de compressió i les diferències de pressió entre els dos gasos. Aquesta forma de transport necessitaria una modificació i disseny de components que s'ajustin a les característiques de l'hidrogen.

1.5.2 Transport de l'hidrogen en forma líquida

L'hidrogen normalment es transporta de forma líquida per una qüestió econòmica. Un camió cisterna que transporti l'hidrogen líquid equival de 15 a 30 camions d'hidrogen en forma de gas a pressió. El transport de l'hidrogen líquid es realitza mitjançant camions, ferrocarril i transport marítim.

El transport per carretera es fa mitjançant dipòsits *Dewar* de 48000 l i 5200 l instal·lats en camions. Hi ha camions especials que poden arribar a transportar dipòsits de fins a 80000 l. Tots els dipòsits tenen una multicapa d'aïllament amb pèrdues d'un 0,25% per dia, per ebullició.

El transport per ferrocarril es fa amb cisternes també *Dewar* horitzontals , de forma cilíndrica amb capacitat de 10000 litres, encara que algunes poden arribar a transportar 120000 litres

Pel que fa al transport marítim les cisternes que s'utilitzen en els bucs de càrrega també son *Dewar*; aquests dipòsits tenen una capacitat d'un milió de litres. Un exemple d'aquest tipus de transport es realitza en l'actualitat entre Luisiana i el Kennedy Space Center a Florida.

En aquest cas per tornar l'hidrogen a forma gasosa s'utilitzen convertidors que es troben en el lloc d'utilització de l'element; la capacitat normal d'aquests convertidors és de fins a 3000 m^3/h.

2.Pila de combustible

2.1 HISTÒRIA

Per tal de realitzar una breu i concisa història de les piles de combustible, hem fet una llista dels científics que realitzaren les aportacións més important al camp de les piles de combustibles, tant en la invenció com en el seu perfeccionament.

William Robert Grove

William Robert Grove (1811-1896), advocat i científic amateur, desenvolupà al 1839 la primera cel·la de combustible. Durant un experiment va desconnectar per accident la bateria de l'electrolitzador i va connectar els dos elèctrodes, observant que circulava un corrent en direcció contrària tot consumint els gasos d'hidrogen i oxigen. A aquest nou aparell l'anomenà bateria de gas i consistia en dos elèctrodes de platí col·locats en tubs d'assaig d'hidrogen i oxigen en un bany d'àcid sulfúric diluït. La tensió generada era d'un volt. Grove combinà diversos elèctrodes en un circuit en sèrie al que denominà cadena de gas. L'electricitat generada alimentava un electrolitzador per obtenir hidrogen i oxigen de l'aigua. Degut a problemes de corrosió e inestabilitat dels materials, la cel·la de combustible de Grove no era pràctica.

Ludwig Mond (1839 – 1909) i el seu ajudant Carl Langer van descriure en els seus experiments una cel·la de combustible hidrogen-oxígen que arribava els 6 A/pie^2 (64,6 A/m^2) a 0,73 volts. Utilitzant elèctrodes prims de platí perforat i electrolits sòlids banyats per un material porós no conductor, de forma semblant a les bateries seques.

Fiedrich Wilhelm Ostwald (1853 – 1932), va determinar experimentalment al 1893 el paper que jugaven els diferents elements de la cel·la de combustible.

Wiliam W. Jacques (1855 – 1932) va construir al 1896 una bateria de carbó on s'injectava aire a un electròlit alcalí per reaccionar (és el que pensava) amb un elèctrode de carbó. El rendiment que va obtenir va ser del 8% (termoelèctric) en lloc de 82% (electroquímic).

Emil Baur (1873 – 1944) de Suïssa va dirigir una amplia investigació sobre dispositius d'alta temperatura i electròlits sòlids d'argila i òxids metàl·lics.

Francis Thomas Bacon

Francis Thomas Bacon (1904 – 1992) enginyer químic de la Universitat de Cambrigde, construí al 1939 una cel·la amb elèctrodes de níquel treballant a pressions de 200 bar. Al 1950 va construir la primera cel·la de combustible pràctica d'electròlit alcalí (KOH). Els elèctrodes eren de pols de níquel porós (més barat que el platí), els gasos podien difondre a través d'ell per estar en contacte amb l'electròlit aquós a l'altre costat dels elèctrodes. Aquesta disposició augmentava les ares de contacte amb els elèctrodes, els gasos i l'electròlit, incrementant la densitat de potència de la cel·la de combustible. Al 1958 va demostrar el funcionament d'una cel·la de combustible amb elèctrodes de 10 polzades (254 mm) de diàmetre i aquesta tecnologia s'aplicà en el mòdul espacial Apollo.

2.2 PRINCIPI DE FUNCIONAMENT

2.2.1 Funcionament

El principi de funcionament de la pila de combustible consisteix en una reacció química en el si de l'aigua, amb ions OH^- que provenen de la dissolució de l'electròlit, Hidròxid Potàsic (KOH), entre dos components que alimenten la pila, l'hidrogen i l'oxigen. Amb el resultat d'una transferència d'electrons que donen lloc a un corrent que s'utilitza en una càrrega exterior. És una forma inversa de l'electròlisi.

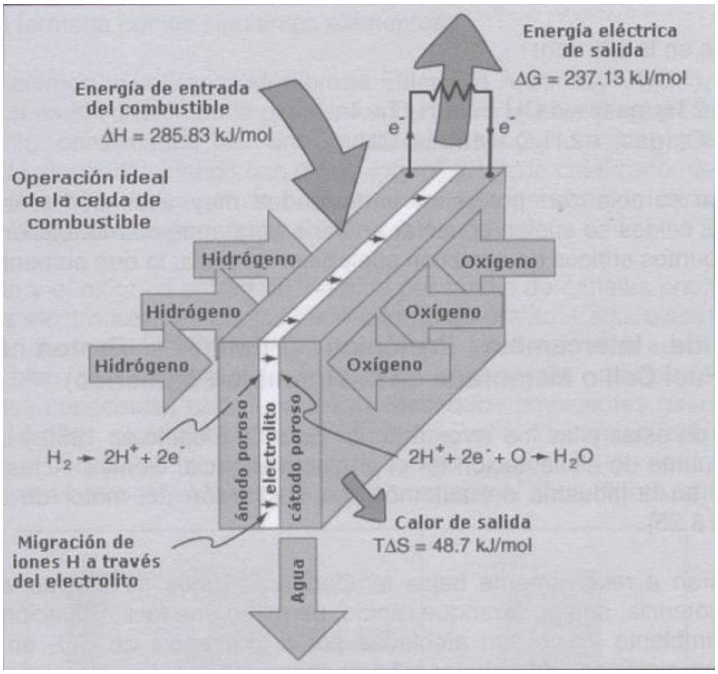


Diagrama de flux de la cel·la
(Font: Energías Renovables)

A l'ànode, l'hidrogen, en presència d'un catalitzador, s'uneix als ions OH^- de l'aigua i la reacció química és:

$$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^- \qquad (1)$$

Amb el resultat de consum de ions OH^-, la producció d'aigua i l'aportació de 2 e^- (-1.8 V). Al càtode l'oxigen, en presencia d'un catalitzador, s'uneix amb l'aigua i la reacció química és:

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \qquad (2)$$

Amb el resultat d'absorció d'aigua i de 4 e^- (+0.43V) i l'alliberació de ions OH^-

Unint les dues parts a través d'una paret porosa s'aconsegueix que els ions OH^- que consumeixen en la reacció de l'hidrogen (1) provinguin de la reacció de l'oxigen (2), i que l'aigua que s'allibera a la primera reacció (1) passa a ser consumida per la segona reacció (2). Unint els dos elèctrodes submergits en cada una de les dues solucions s'aconsegueix una diferencia de potencial de +0.43-(-0.8)=+1.23V.

És clar que per produir tensions més elevades les cel·les s'uneixen en sèrie formant un apilament o stack, anomenat pila de combustible. Observant les dues reaccions, es veu que si en la reacció (2) es consumeixen exactament el mateix número d'electrons que els alliberats en la (1), llavors, la (1) consumirà exactament tots els ions OH^- produïts per la (2). És a dir:

$$2H_2 + 4OH_2 \rightarrow 4\ H_2O + 4e^- \qquad O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4\ OH^-$$

Es demostra que sobrarà aigua, i que s'haurà d'eliminar (normalment per evaporació). Doncs així, la pila de combustible pot considerar-se com un sistema en què s'injecta H_2 i O_2 i s'obté aigua, calor i energia elèctrica. A les piles PEMFC (intercanvi de protons) es recomana la utilització d'H_2 pur, degut a l'enverinament de CO que podria causar la resta de portadors d'H_2.

2.2.2 El rendiment

El rendiment termodinàmic de la pila en condicions estàndard (25ºC i 1 atm) i amb l'aigua en estat líquid, és:

$$\text{Rendiment termodinàmic}=\frac{\Delta\text{Energía química (energia de Gibbs)}}{\Delta\text{Energia química reacció } H_2/O_2}=\frac{237{,}2\text{ KJ/mol}}{285{,}8\text{ KJ/mol}}=0{,}83=83\%$$

El rendiment teòric anterior baixa al 60% si es consideren els dispositius necessaris per injectar l'H_2 i l'O_2, tornar a fer circular els cabals sobrants i eliminar el vapor d'aigua. El rendiment tèrmic pot expressar-se com la relació entre el voltatge d'operació i el voltatge ideal de la cel·la. Una cel·la operant en mode reversible amb hidrogen i oxigen a 25ºC i 1 atm té un voltatge ideal de 1,229 V. Per tant, el rendiment resultant és:

$$\text{Rendiment} = 0{,}83\times\frac{\text{V cel·la}}{\text{V ideal}\,1{,}229} = 0{,}83\times\frac{\text{V cel·la}}{1{,}229} = 0{,}675\times\text{V cel·la}$$

2.2.3 Intensitat i voltatge aportat

La cel·la pot operar a diverses densitats de corrent A/cm^2, de tal manera que una disminució de la densitat de corrent augmenta el voltatge i per tant el rendiment, però s'ha d'augmentar l'àrea per obtenir igual potència, cosa que representa un major cost econòmic compensat amb un menor cost d'operació. Essent la reacció en la cel·la de: $H_2 + ½\ O_2 = H_2O$, la tensió màxima que una cel·la de combustible pot donar es calcula amb:

$$E= -\frac{G}{n\times F}$$

G= Energia lliure de Gibbs
N= Número de mols d'electrons/mol d'H_2 en la reacció
F= Constant de Faraday = 96.487 Coloumbs

A la pressió d'1 atmosfera i a la temperatura de 25ºC:

$$G=H - T\times S= -285.800\text{J} - (298\text{ K})\times(-163{,}2\text{ J/K}) = -237.166\text{ J}$$

$$E= -\frac{G}{n\times F} = -\frac{-237.166\text{ J}}{2\times 96.487} = 1{,}23\text{ Volts.}$$

Amb un augment de temperatura de 80º C, l'ús d'aire en lloc d'oxigen, i amb l'aire i l'hidrogen humificats, la tensió es redueix a 1,16 Volts. Una cel·la de combustible de 100 cm^2 operant a 1 atm i a 80º C, a 0,7 V i que genera 0,6 A/cm^2 tindrà una intensitat total de 60 A. El calor generat serà:

Calor residual= (Voltatge ideal)$\times$(Intensitat cel·la)-(Voltatge cel·la)$\times$(Intensitat cel·la)=
(Voltatge ideal-Voltatge cel·la)$\times$(Intensitat cel·la)=(1,16-0,7)$\times$60$\times$60=1.656 J/minut

Així doncs aquesta cel·la genera 1,656 kJ/min de calor en excés mentre genera 0,7$\times$60$\times$60=2,52 kJ/minut d'energia elèctrica. Com que cada cel·la genera 1,16 V, per disposar de voltatges industrials de 12V o 24V c.c., és necessari connectar les cel·les individualment en sèrie en piles (stacks); d'aquí el nombre de piles de combustibles.

2.2.4 Elements externs que fan variar les característiques de la pila

- L'augment de la temperatura d'operació afavoreix el rendiment de la cel·la perquè augmenta les taxes de reacció i de transferència de masses i redueix la resistència de la cel·la per la major presència de ions en l'electròlit. No obstant això, pot augmentar la corrosió del material, la degradació dels elèctrodes, la seva recristalització i la pèrdua d'electròlit per evaporació. Cal assenyalar que l'hidrogen i l'oxigen exploten violentament a temperatures superiors a 580ºC.

- Les pèrdues per polarització òhmnica augmenten linealment fins augmentar la densitat de corrent, fins a un límit màxim on és difícil aportar cabals suficients dels reactius.

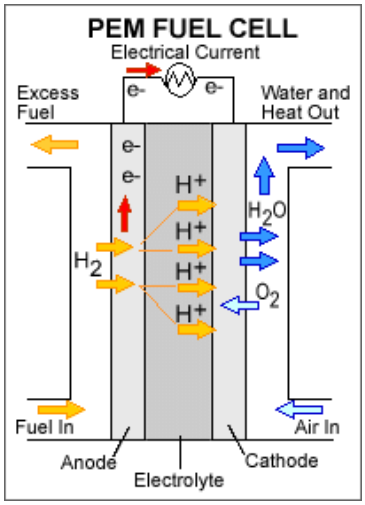
- Després, per una cel·la donada, pot modificar-se el seu rendiment actuant sobre les condicions d'operació, tal com altes pressions i temperatures, canvis en la composició del gas (H_2 i O_2), o millora de la puresa del gas H_2.

2.3 PILES DE COMBUSTIBLE POLIMERIQUES PEMFC (PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL) I PEFC (POLIMER ELECTROLITE FUEL CELL-PEFC)

Utilitzen com electròlit una membrana polimèrica, basada en àcids sulfònics perfluorats, que han de mantenir-se completament hidratats durant l'operació per afavorir la conducció dels protons. Aquest requeriment limita la temperatura d'operació per sota de 100ºC, són d'arrencada ràpida, permeten una fàcil dissipació de la calor a temperatura ambient i no són afectades per la presència de CO_2 en l'aire. En ser aigua l'únic líquid que s'utilitza, els problemes de la corrosió són mínims. El catalitzador normalment utilitzat és el platí suportat sobre carbó, o electrocatalitzadors metàl·lics bifuncionals amb base de platí i un element metàl·lic com el ruteni, que fa l'elèctrode més resistent a l'enverinament per monòxid de carboni quan el combustible utilitzat no és hidrogen pur. Són capaces de treballar a altes densitats de corrent, amb una ràpida resposta a demandes de potència variable, cosa que les fa més adequades per a la seva aplicació en el transport; de fet, el seu major nivell de desenvolupament és degut a l'interès despertat en la indústria automobilística.

Requereixen hidrogen d'una elevada puresa (superior al 99,9999%) en l'ànode i oxigen o aire en el càtode. Qualsevol altre combustible ha de passar per un procés previ de reformat per convertir-lo en hidrogen, excepte el metanol que pot ser utilitzat directament en les anomenades piles de combustible de metanol directe, que són també d'electròlit polimèric.

Els reptes actuals estan en disminuir el cost i augmentar l'eficiència, cosa que es tradueix a disminuir la massa de platí, reduir el gruix de la capa catalítica i optimitzar la dispersió del catalitzador, millorar les prestacions de la membrana polimèrica i trobar un material alternatiu al grafit per la placa bipolar d'alta conductivitat elèctrica i tèrmica, resistents a la corrosió, més lleugers i econòmics.



(Font: http://www.eere.energy.gov)

Les reaccions en la pila són:

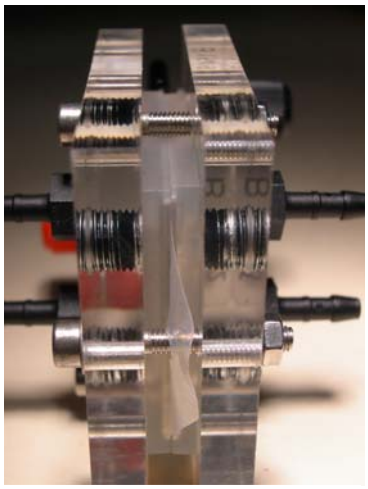
Ànode: $H_{2(g)} \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Càtode: $\frac{1}{2} O_{2(g)} + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O_{(l)}$

Cel·la: $H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O_{(l)}$

2.3.1. Elements de la cel·la

- **Conjunt elèctrode-membrana (Membrane Electrode Assembli – MEA)**: d'1 mm de gruix, que és el cor de la pila de combustible i que està estructurada en forma d'entrepà. És en una membrana conductora de ions polimèrica, recoberta d'elèctrodes plans amb capes interposades de catalitzador de platí i que incorporen una fulla de paper de carbó o una tela de fibra de carboni formant capes per a la difusió del gas.

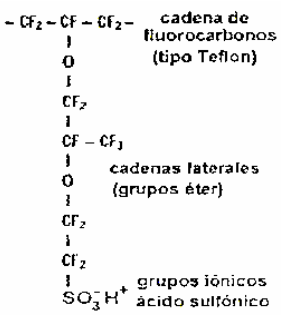

MEA de la pila

L'hidrogen i l'oxigen entren a la cel·la per mitjà de canals practicats als costats dels elèctrodes o en plaques separadores de grafit. Aquestes plaques separadores proporcionen la connexió elèctrica amb la següent MEA i poden adoptar dues formes diferents: estar separades connectades a elèctrodes individuals o bé són plaques úniques connectades cada una a dos elèctrodes adjacents (placa bipolar).

A través de la membrana han de passar ions H^+ però no electrons, i per les plaques separadores ha de passar el corrent però no aigua, hidrogen i oxigen.

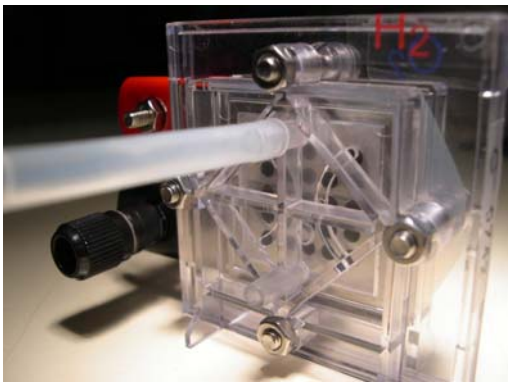
La membrana de la cel·la és l'electròlit i ha de reunir qualitats com la resistència, baix cost, i facilitat per ser recoberta de ionomero en la pel·lícula porosa. Un dels materials adequats és el PTFE (àcid polimèric perfluorosulfònic-politetrafluoro d'etilè). El material ionomer és el Naifon fabricat per Dupont o per altres marques.

La membrana incrementa la capacitat d'intercanvi de ions quan està humida. L'aire d'entrada ha d'estar humificat mitjançant esprais d'aigua o amb petites instal·lacions d'aire condicionat que proporcionen la humitat adequada a la temperatura de treball. La membrana és un material porós que permet el pas de petites molècules polars (aigua, CH_3OH, urea, etc.) i que, en ser molt prima, facilita el muntatge de cel·les estretament apilades amb l'avantatge d'obtenir potències elevades, una alta conductància i unes baixes pèrdues òhmniques. Si la temperatura d'operació s'eleva a 200ºC amb l'objectiu que la cel·la resisteixi les impureses i el CO a l'hidrogen, la membrana ha de ser resistent a la temperatura, tal i com és el polímer polibenzimidazole (PBI) fabricat per Celanese.



Fórmula del Nafion

- **L'ànode i el càtode:** es fabriquen de tela o fulla de grafit i tenen la forma de pel·lícula fina unida a la membrana. Contenen partícules d'aliatge metàl·lica molt dispersa (la major part és platí 0.32 mg/cm^2), que es comporten com a catalitzadors molt actius. Si la pila PEMFC s'alimenta amb hidrogen procedent d'un reformador, com que contenen petites quantitats de CO, és necessari utilitzar platí-ruteni (PtRu) a l'ànode, per prevenir l'enverinament amb CO. El catalitzador PtRu tolera concentracions fins 100p.p.m. (parts per milió) de CO.



Ànode i càtode de la pila

Per eliminar la calor que es produeix en el funcionament de la pila s'inserten a intervals entre les cel·les actives, plaques de refrigeració en la relació 1:2, per les quals circula aigua. Aquestes plaques són de dimensions idèntiques a les de les cel·les actives i estan proveïdes de juntes (empaquetadores) per evitar fugues de líquid de refrigeració. La quantitat de Pt necessària en cada elèctrode, segons la NASA, és de 0,3 g/m^2. No obstant això, l'elevat preu del platí obliga a desenvolupar tècniques per tal que la quantitat sigui menor o bé buscar un altre material que el substitueixi. Al Laboratori Nacional de los Álamos a EE.UU., s'utilitza Pt en la proporció de 0,021 g/m^2.

En la cel·la es necessita un alt contingut d'aigua en l'electròlit per mantenir una alta conductivitat iònica, i ha d'existir un equilibri entre la producció de l'aigua en la reacció química i la seva evaporació. Si la humitat és escassa hi haurà una dissolució dels gasos reactants per al vapor de l'aigua i una falta d'adherència de la membrana a l'elèctrode, per la qual cosa és necessari humificar el gas d'entrada. Si la humificació és excessiva, l'elèctrode inunda causant problemes en els gas difós. Cada cel·la produeix uns 0,7 volts de c.c.; per això, per obtenir tensions més grans (12V, 24V o 500V en el cas d'un automòbil), s'han de muntar en sèrie formant stacks, formats de perns per fixar les cel·les, amb col·lectors de corrent situats als extrems de la pila i amb aïlladors i plaques extremes i disposat tot el conjunt en una caixa aïllada elèctricament.

2.3.2 Prestacions de la cel.la

Les prestacions de les PEMFC han millorat molt en els últims anys. S'han aconseguit densitats de potència de 6,4 Kw/m^2 de corrent de 9,15 KA/m^2 amb una tensió de 0,7 V per cada cel·la, amb hidrogen i oxigen a unes 4 atm de pressió. Si l'hidrogen i l'oxigen s'introdueixen a pressió ambient, es poden arribar a aconseguir densitats de potència de 3,8 Kw/m^2 i densitats de corrent de 5,4 KA/m^2. Amb membranes especials els valors passen a 21,5 kw/m^2 i 43 KA/m^2. El rendiment en la conversió d'hidrogen a electricitat, considerant el valor calorífic més baix, és de l'ordre de 80 vegades la tensió de la cel·la. D'aquest mode, el rendiment d'una cel·la funcionant a +0,7 V és del 56%. El rendiment augmenta amb un baix cost de combustible, en reduir el corrent extret amb el que augmenta la tensió, però això comporta una disminució de la potència de la cel·la, pel que fa en aquest cas és necessari afegir més cel·les a la pila. El rendiment del sistema complet és menor que el de les cel·les individuals, ja que el compressor d'aire, el circuit de refrigeració, l'equip de control i el reformador (si s'utilitza), consumeixen energia. Si la càrrega es redueix, el rendiment augmenta, que és el contrari del que ocorre als motors de combustió interna. En canvi, la pila de combustible presenta menys emissions de NO_x, SO_2, CO, i partícules. Ja que les PEM treballen a temperatures baixes i l'electròlit és sòlid, s'eviten problemes com fugues, corrosió, migració o recristal·lització, per això aquestes piles tenen una vida útil demostrada amb valors a prop a les 50000 hores.

Les PEM treballen a temperatures al voltant dels 80ºC. Aproximadament, el 50% de la potència es pot obtenir de forma immediata a temperatura ambient, mentre que la potència màxima s'aconsegueix 3 minuts després de començar a treballar. Algunes barreres que s'han de vèncer perquè aquestes piles siguin utilitzades universalment són, per un costat, el cost dels materials de la membrana i dels catalitzadors, que es compensarà una vegada es fabriquin en massa, per l'altre costat, la necessitat d'utilitzar hidrogen pur (99,998%) pel risc de contaminació de la pila amb CO i altres impureses, problema que s'obviaria si les membranes treballessin a major temperatura (>180ºC) i els catalitzadors fossin més tolerants. Aquestes piles tenen moltes aplicacions en vehicles lleugers, edificis, i potencialment altres aplicacions molt més petites com els telèfons mòbils, les cameres digitals, i les vídeo cameres. Tot i que fa falta millorar la seva eficàcia (rendiment, volum i pes) i reduir els costs de fabricació, es consideren com una de les tecnologies de pila de combustible més prometedores.

3. Experimentació amb la pila d'hidrogen

3.1 DESCRIPCIÓ DELS ELEMENTS UTILITZATS:

Sistema de pila de combustible per alumnes Heliocentris, 13012

Cel·la solar del Kit	
Dimensions	70 x 120 x 52 mm
Tensió en circuit obert (fem)	3.0 V
Corrent en curtcircuit	245 mA
Tensió en màxima potència	2,4 V
Corrent en màxima potència	200 mA
Potència generada	0,48 W

Electrolitzador PEM	
Dimensions	85 x 190 x 90 mm
Consum de potència	1.0 W
Tensió necessària	1,4 – 1,8 V
Corrent màxim	0,5 A
Volum d'emmagatzement d'hidrogen i oxigen	10ml cada un
Ritme de producció d'Hidrogen màx.	3,5 ml/min a 0,5 A
Consum d'aigua destil·lada	0,1ml/h a 0,3 A

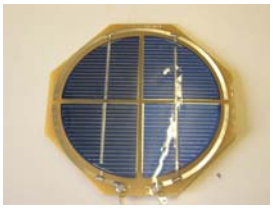
Pila de combustible PEM	
Dimensions	85 x 70 x 70 mm
Tensió generada	0.4 V- 1.0 V
Potència generada	0,5 W
Ritme de consum d'hidrogen	7 ml/min. a 1.0A

Focus de llum	
Potència	120W
Tipus de bombeta	Incandescència

Caixa mesures	
Dimensions	190 x 110 x 85 mm
Resistència graduable en 7 posicions	1, 3, 5, 10, 50, 100, 200 ohm
Tensió de funcionament del motor	0,2 – 0,3 V
Corrent del motor	10 – 15 mA
Tensió de funcionament de la làmpada	1,5 V
Corrent de la làmpada	80 mA
Rang de l'amperímetre	0 – 2 A
Rang del voltímetre	0-20 V
Alimentació pels indicadors digitals	2 piles 9V

Altres elements utilitzats a les pràctiques:

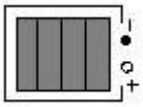
Cel·la solar recoberta de resina epoxi	
Dimensions	117 x 122 x 4
Tensió en circuit obert (fem)	2,86 V
Corrent en curcircuit	550 mA
Tensió en màxima potència	2 V
Corrent en màxima potència	500 mA
Potència generada	1 W



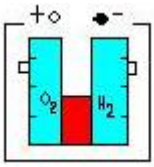
Equip multilog pro:

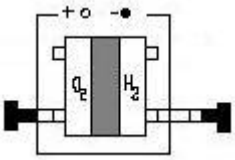
Aigua destilada

Llegenda:

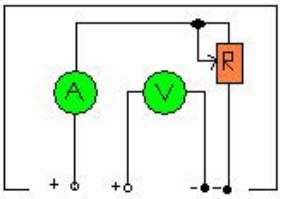
Cel·la solar: 

Sensor de llum:

Electrolitzador PEM: 

Cel·la de combustible PEM: 

Focus de llum:

Caixa mesures: 

3.2 EXPERIÈNCIES

3.2.1 Experiència 1: Caracterització de la corba característica de la cel·la fotoelèctrica i màxima potència

Introducció:

Aquesta experiència consisteix en la utilització de la cel·la solar, sotmesa a estudi, com a generador d'un circuit on s'aplicaran diverses resistències amb la intenció d'obtenir les diferents intensitats en funció del voltatge, es a dir la seva corba característica, d'on podrem calcular la seva resistència interna i la màxima potència. Aquesta experiència s'aplicarà sobre els dos tipus de cel·la que tenim per tal de valorar les seves característiques i decidir quina utilitzarem en les pràctiques següents i en el projecte final.

Objectiu:

Obtenir la corba característica de la cel·la i trobar la resistència interna i potència màxima. Amb la comparació de les corbes obtingudes per les dues plaques podrem decidir quina placa utilitzarem per a les següents pràctiques.

Hipòtesis:

I. El comportament de les cel·les tindran un comportament ohmnic.
II. La corba característica mostrarà una recta o quasi una recta.
III. Calculant el pendent de la gràfica podrem obtenir la resistència interna.
IV. La fem de la cel·la deu tenir un valor màxim, característic del fabricant, un cop s'ha arribat aquest valor l'augment de la intensitat de la llum no el fa variar.

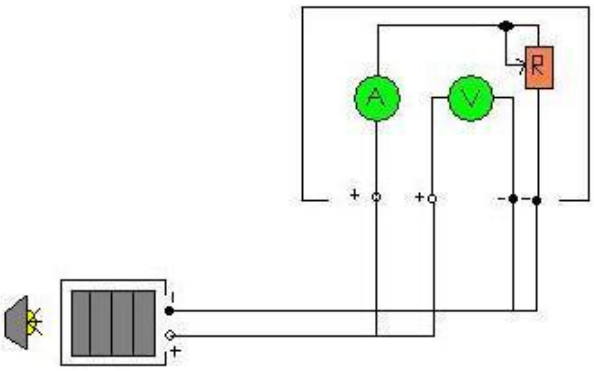
Material:

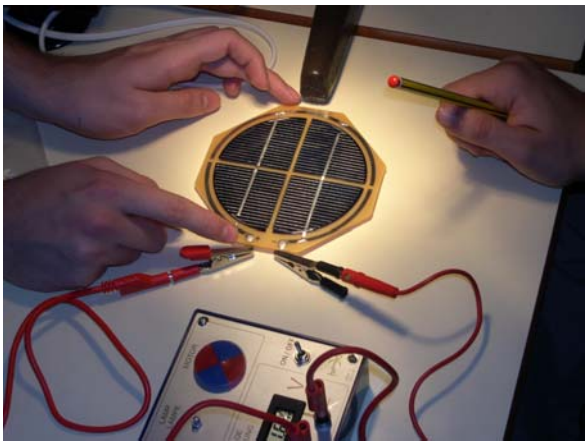
1.- Cel·la solar del kit
2.- Cel·la solar recoberta de resina epoxi
3.- Caixa de mesures
4.- Focus de llum
5.- Aigua destil·lada
6.- Cables de connexió

Procediment:

Com es pot veure a l'esquema situat a la part inferior d'aquest apartat, hem posat les cel·les horitzontalment en una taula. Utilitzant un suport de laboratori hem situat la font de llum (bombeta d'incandescència) a 30 cm de la cel·la. Posteriorment hem connectat la cel·la a un circuit on actuava de generador i li hem aplicat diverses carregues per a poder obtenir les diverses variacions de voltatge i intensitat.

Connexions:



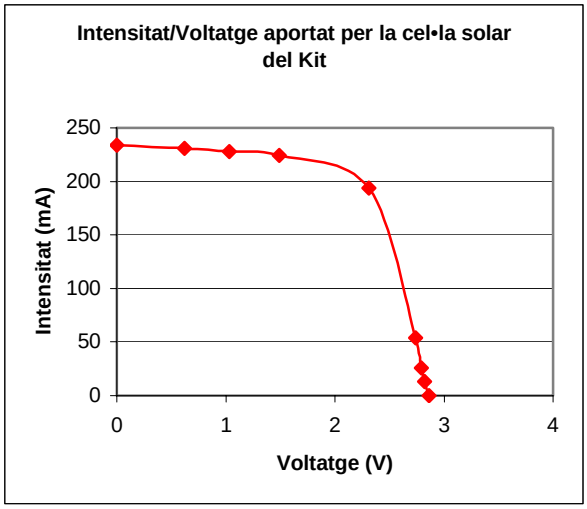


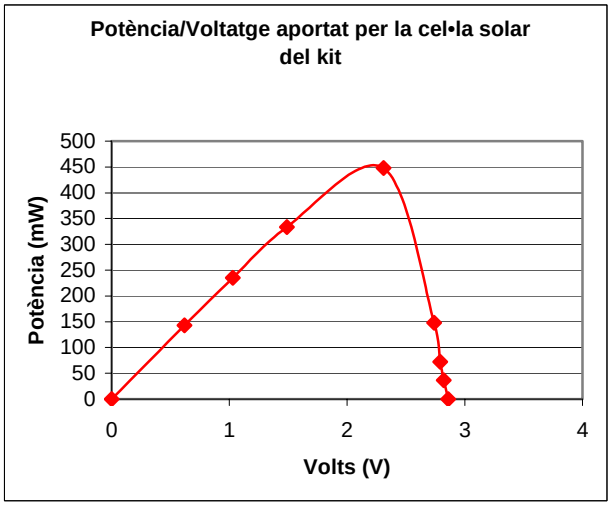
Fent el muntatge

Dades obtingudes:

- *Cel·la solar del Kit*

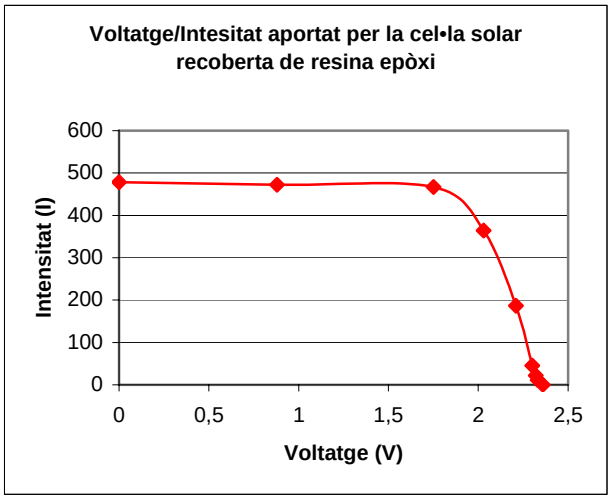
Resistències (Ω)	Intensitat (mA)	Voltatge (V)	Potència (mW)
0	0	2,86	0
200	13	2,82	36,66
100	26	2,79	72,54
50	54	2,74	147,96
20	194	2,31	448,14
5	224	1,49	333,76
3	228	1,03	234,84
1	231	0,62	143,22
curtcircuit	234	0,00	0,00

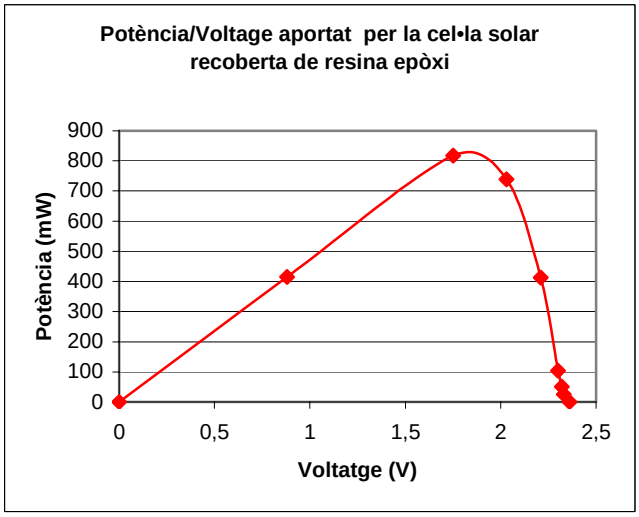




- *Cel·la solar recoberta de resina epoxi*

Resistències (Ω)	Intensitat (mA)	Voltatge (V)	Potència (mW)
0	0	2,36	0
200	11	2,33	25,63
100	22	2,32	51,04
50	45	2,3	103,5
10	187	2,21	413,27
5	364	2,03	738,92
3	467	1,75	817,25
1	472	0,88	415,36
curtcircuit	478	0	0





Conclusions:

Clarament es pot comprovar que la nostra hipòtesi sobre el comportament ohmnic de les dues plaques era clarament erroni. Primerament el resultat que mostren les gràfiques no ha tingut la forma de recta definida que nosaltres pensàvem. Després d'estar comprovant repetidament els resultats i la corba donada hem arribat a diverses conclusions:

1) Pel tipus de corba obtingut pensem que podria tractar-se d'una gràfica que mostraria el comportament d'un element fabricat amb semiconductors ja que és semblant a la d'un diode, component electrònic, que com la placa està fabricat amb materials semiconductors. Aquest materials solen reaccionar de la mateixa manera i aquesta pot ser la causa per la qual la gràfica és tant diferent de la que ens pensàvem i no mostra un comportament ohmnic.

2) Fent referència a la resistència interna de la placa es pot comprovar que és variable. Aquesta característica diferencia aquesta cel·la respecte a un generador de corrent continu normal. Els generadors normals presenten una resistència fixa que es pot calcular o trobar mitjançant la corba característica. Aquí podem veure que hi ha diferència, les cel·les presenten resistències internes: aquest fet podria ser degut al material semiconductor amb què estan construïdes.

3) Pels resultats de la gràfica de potència veiem que s'aconsegueix una major potència en el segon model de cel·la fotoelèctrica (cel·la solar recoberta de resina epoxi), per tant la farem servir en les següents pràctiques, ja que creiem que reduirà el temps de producció d'hidrogen.

3.2.2 Experiència 2: Caracterització de la corba característica de l'electrolitzador

Introducció:

Aquesta experiència consisteix en la connexió de la cel·la solar a l'electrolizador, i posteriorment fer variar el corrent i el voltatge aportat per la cel·la, variant la inclinació respecte a la font de llum o aplicant diferents resistències al circuit. Amb aquesta experiència podrem observar el procés que fa l'aigua conductiva amb l'addicció d'un electròlit (en aquest cas sòlid) i amb l'aplicació de dos elèctrodes amb una diferència de potencial.

Objectius:

Aquesta experiència ens permetrà trobar les diferents intensitats en funció del voltatge, és a dir, la corba característica de l'electrolitzador, una dada molt important per a conèixer el funcionament de l'electrolitzador i de la reacció d'electròlisi. Aquesta informació ens permetrà saber la capacitat de transformació d'energia elèctrica en química i calcular, més endavant, el rendiment d'aquest aparell.

Hipòtesis:

I. L'electrolitzador com element de consum en un circuit elèctric té una resistència interna .
II. La resistència de l'electrolitzador és fixa . Tindrà comportament ohmnic
III. La gràfica resultant de la corba característica tindrà forma de recta ascendent i per tant, adjuntant-li una línia de tendència i calculant el pendent podrem obtenir la resistència interna.

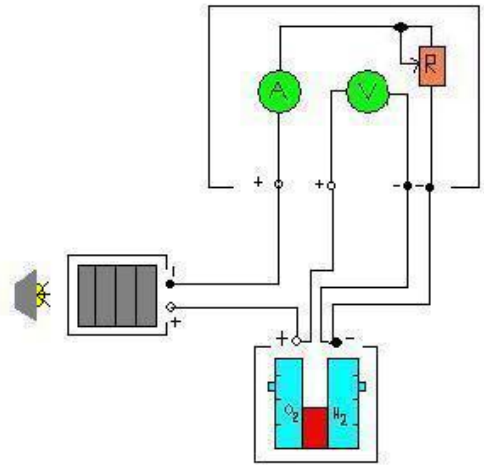
Material:

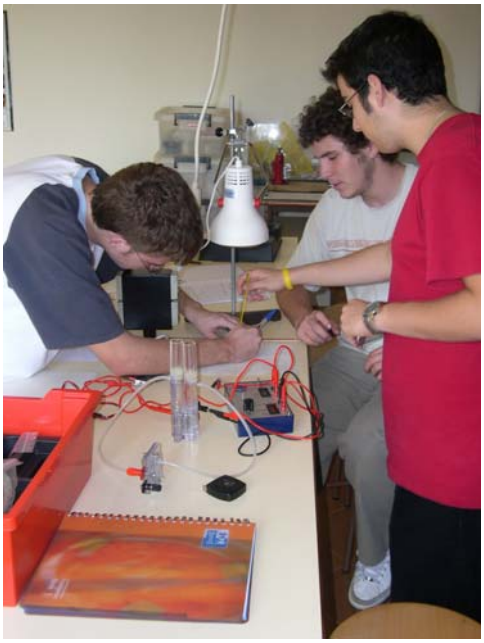
1.- Cel·la solar recoberta de resina epoxi
2.- Caixa de mesures
3.- Electrolitzador PEM
4.- Focus de llum
5.- Aigua destil·lada
6.- Cables de connexió

Procediment:

Hem connectat la cel·la fotoelèctrica a l'electrolitzador, ple d'aigua, i, al circuit, hi hem aplicat diverses resistències per tal d'obtenir els diferents voltatges i intensitats. Amb aquestes dades hem dibuixat la corba característica.

Connexions:



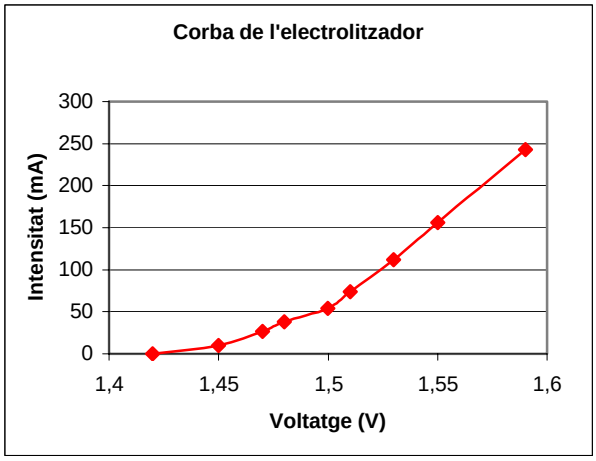


Fent el muntatge

Dades obtingudes:

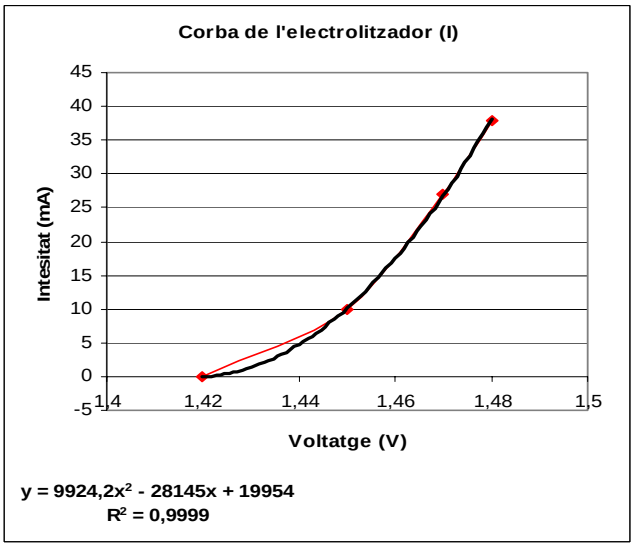
1. *Gràfiques*

Intensitat (mA)	Voltatge (V)
440	1,66
243	1,59
156	1,55
112	1,53
74	1,51
54	1,5
38	1,48
27	1,47
10	1,45
0	1,42

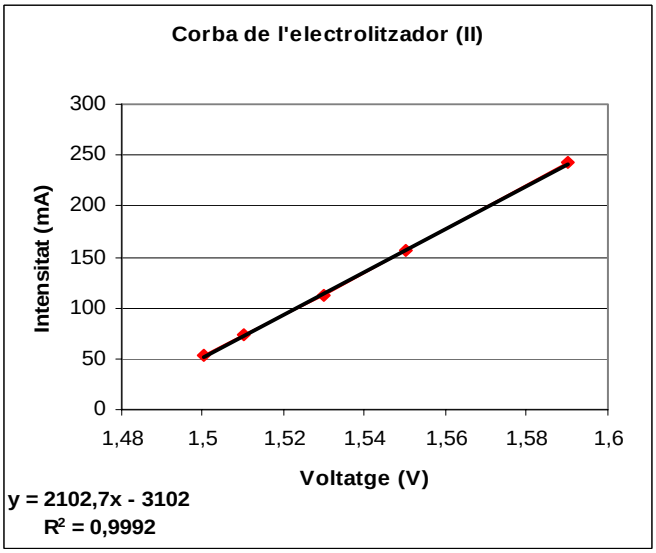


Podem observar que aquesta primera gràfica no mostra un pendent constant, per tal de realitzar les conclusions hem cregut correcte dividir aquesta primera gràfica en dues, ja que hi ha clarament una segona part on sí que és apreciable un pendent constant. Aquesta divisió pot fer més entenedor el procés d'electròlisi.

(1)



(2)



Càlculs:

- *Càlcul de la resistència de l'electrolitzador*

El pendent, que mostra, la segona part de la gràfica, ve determinat per la fórmula: Inetensitat/Voltatge, però la formula de la resistència és Voltatge/Intensitat. Per tant, obtindrem la resistència de l'electrolitzador fent l'invers del pendent que mostra la segona part de la gràfica.

$y = 2102{,}7x - 3102$; Pendent = 2102,7; Resistència = $\frac{1}{\text{Pendent}}$

Resistència = $\frac{1}{2102{,}7} = 4{,}7557\text{x}10^{-4}\ \text{k}\Omega = 0{,}476\ \Omega$

Conclusions:

Primerament, hem de dir que hem analitzat per separat la corba característica de l'electrolitzador:

- **La primera part**, de 0 volts fins a 1,5, la gràfica mostra una corba.
- **La segona part,** des de 1,5 volts fins a 1,66 volts, la gràfica mostra una recta.

El motiu d'aquesta divisió ha estat la nostra convicció que podríem trobar la resistència de l'electrolitzador en el pendent de la gràfica (2) ja que és recta. En canvi la gràfica (1) es deu correspondre a l'inici del procés d'electròlisi, per tant la resistència va variant fins a fer-se constant a la gràfica (2).

Després de veure l'incompliment de les nostres hipòtesis hem intentat trobar una explicació dels resultats obtinguts basant-nos en la teoria de l'electròlisi de l'aigua. Seguidament presentem les interpretacions que hem fet dels resultats abans esmentats.

1) La resistència de l'aigua pura és molt gran, per tant la conductivitat és molt petita. El pendent de la corba característica és aproximadament 0, per tant, la resistència és infinita. Aquest fet s'aprecia a la primera part on es pot observar l'inici de la reacció, a 1,42V: aquest seria el potencial mínim a partir del qual l'aigua comença a conduir ja que s'inicia el procés químic de la seva descomposició.

2) En la corba el corrent comença a tenir un valor a partir de 1,24 V; seguidament el corrent s'incrementa de manera contínua. Per a comprendre aquest fet hem de tenir en compte la següent explicació:

La dissociació de la molècula d'aigua es realitza en diverses fases que són les següents:

		Energia electromotriu:
Ànode	$H_2O \rightarrow O_2 + 2\ H^+$	(-0,815 V)
Càtode	$2e^- + 2\ H^+ \rightarrow H_2$	(-0,414 V)
Total	$H_2O \rightarrow ½\ O_2(g) + H_2$	(-1,23 V)

Podem dir que aquest voltatge, anomenat tensió de descomposició, és la mínima tensió necessària per generar una força electromagnètica per vèncer l'energia d'enllaç de la molècula d'aigua en condicions estàndard. Per a tensions petites la força és insuficient per a vèncer l'energia d'enllaç. En el moment en què la pressió dels gasos originats iguala a l'externa, els gasos es desprenen en forma de bombolles als dos elèctrodes. A partir del moment en què comença la reacció química, comença la conducció.

3) Hem pogut observar que la tensió teòrica necessària per descompondre la molècula és 1,23 volts, però els resultats experimentals mostren un valor aproximat de 1,42 volts. Per tant la tensió mínima per la qual comença la dissociació de l'aigua no és igual a la tensió de descomposició. La diferència entre la tensió de descomposició teòrica i la tensió de descomposició determinada experimentalment s'anomena sobrepotencial. Els sobrepotencial depèn del material de l'elèctrode, la textura de la superfície de l'elèctrode, la classe i la concentració de l'electròlit, la densitat del corrent (valor del corrent en la unitat de superfície de l'elèctrode) i la temperatura.

Càlcul del sobre potencial:

Tensió de descomposició	Tensió real de descomposició	Sobrepotencial / volts
1,23 V	1,42 V	0,19 V

En el nostre cas, l'electrolitzador, l'hem omplert amb aigua destil·lada i no disposa d'electròlit líquid. Un electròlit és una substància que, fosa o dissolta en un solvent ionitzant, es dissocia donant ions i, doncs, esdevé conductora de l'electricitat.

Quant es descompon l'aigua normalment cal afegir-hi àcid que actua com a electròlit. En el nostre cas aquesta funció la realitza una membrana especial d'intercanvi de protons. Aquesta membrana simula l'acidesa de 1 M d'àcid sulfúric. En medis àcids únicament es poden utilitzar metalls preciosos. Per això, els elèctrodes n'estan recoberts. El costat de l'oxigen la membrana està recoberta per un aliatge especial de ruteni-iridi, pel costat de l'hidrogen amb platí.

4) La segona part de la gràfica mostra una recta, que en aquest cas comença a 1,5 volts, i indica que a partir d'aquest punt la producció de gasos esdevé constant. A partir d'aquest moment sí que podem afirmar que l'electrolitzador mostra un comportament omnhic, per tant, podem calcular la seva resistència interna.

3.2.3 Experiència 3: Caracterització de la corba característica de la cel·la

Introducció:

La cel·la de combustible és un generador químic. Rep aquest nom perquè les substàncies que participen a les corresponents reaccions químiques són introduïdes des de l'exterior com si d'un combustible es tractés. El seu funcionament es basa en la reacció de dos elements, concretament en la cel·la que estudiarem entre l'hidrogen i l'oxigen. Aquesta reacció fa que un elèctrode perdi electrons i un altre en guanyi. Això provoca una diferencia de potencial capaç de produir un corrent elèctric exterior.

Una característica molt important de tots els elements elèctrics, principalment els generadors, és la corba característica. Aquesta mostra l'efecte que té la variació de voltatge sobre la intensitat. La variació es realitza mitjançant l'addicció de resistències externes que varien la intensitat i el voltatge del circuit. En els elements que tenen comportament omnhic, es pot trobar la resistència interna que té l'element estudiat, fent l'invers del pendent que mostra la gràfica.

Aquesta experiència consisteix en la utilització de la cel·la de combustible, sotmesa a estudi, com a generador d'un circuit on s'aplicaran diverses resistències. Això ens permetre obtenir diversos valors de voltatge i intensitat.

Objectiu:

Mitjançant les dades que haurem obtingut podrem dibuixar la corba característica de la cel·la i trobar la resistència interna i potència màxima. Les dades, les utilitzarem per a dissenyar en el futur un circuit que aprofiti la màxima potència.

Hipòtesis:

I. El comportament de les cel·la tindrà un comportament ohmnic.
II. La gràfica voltatge/intensitat mostrarà una recta o quasi una recta.
III. Fent la inversa del pendent de la gràfica podrem obtenir la resistència interna.

IV. El voltatge donat ha de ser al voltant d'1,23 V, ja que el procés realitzat a la cel·la és l'invers al procés que realitza l'electrolitzador.
V. Les dades obtingudes seran similars a les característiques proporcionades pel fabricant.

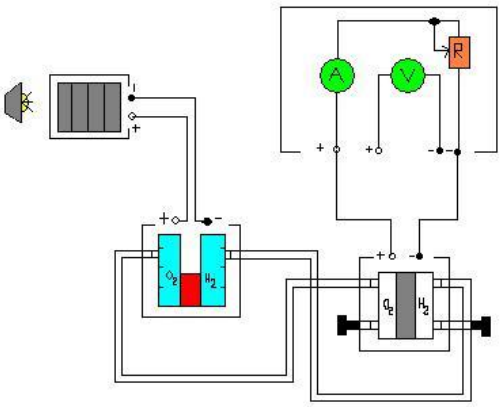
Material:

1.- Cel·la solar recoberta de resina epoxi
2.- Caixa de mesures
3.- Electrolitzador PEM
4.- Cel·la d'hidrogen PEM
5.- Focus de llum
6.- Aigua destil·lada
7.- Cables de connexió

Procediments:

Primerament hem produït, amb l'electrolitzador connectat a la cel·la fotoelèctrica i omplert d'aigua destil·lada, una quantitat d'hidrogen que permetés purgar el sistema i fer funcionar la cel·la correctament. Seguidament hem esperat fins que el voltatge de la cel·la ha arribat al seu màxim, aproximadament 0,90 V. Llavors hem connectat la cel·la a un circuit on hem anat aplicant diverses càrregues per tal d'obtenir diverses lectures de voltatge i intensitat. Amb aquestes dades hem realitzat la corba característica.

Connexions:

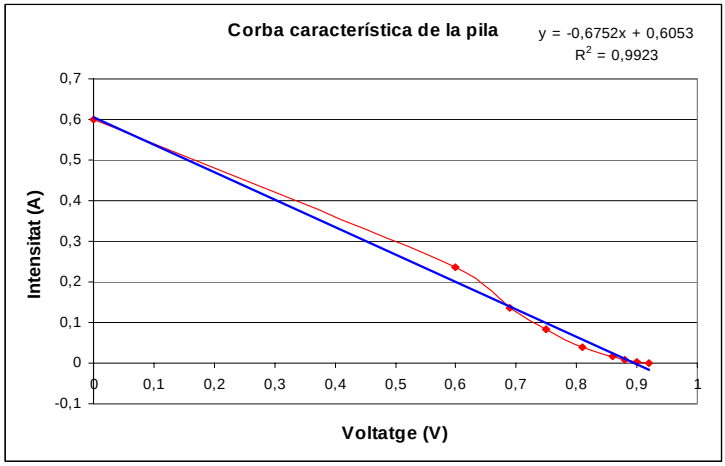


Fent el muntatge

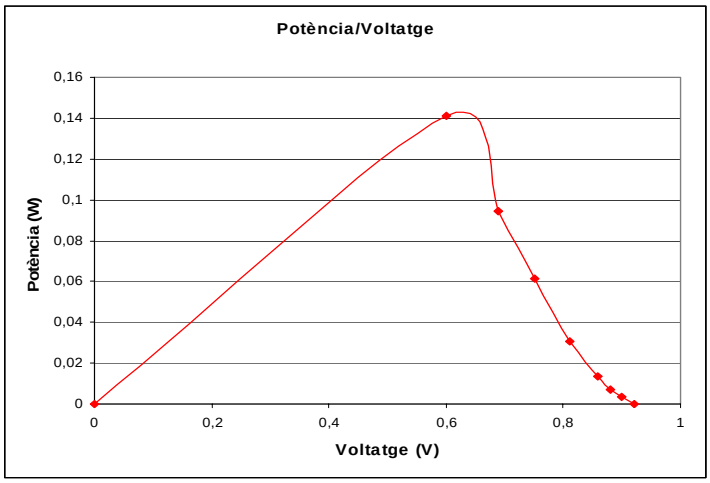
Dades obtingudes:

Voltatge (v)	Intensitat (A)	Potència (W)	Resistències (Ω)
0,92	0,000	0,00000	0
0,90	0,004	0,00360	200
0,88	0,008	0,00704	100
0,86	0,016	0,01376	50
0,81	0,038	0,03078	10
0,75	0,082	0,06150	5
0,69	0,137	0,09453	3
0,60	0,235	0,14100	1
0,00	0,600	0,00000	Curtcircuit

(1)



(2)



Càlculs:

- *Càlcul de la resistència de l'electrolitzador*

El pendent, que mostra la gràfica (1), ve determinat per la fórmula: Inetensitat/Voltatge, però la fórmula de la resistència és Voltatge/Intensitat. Per tant, obtindrem la resistència de l'electrolitzador fent l'invers del pendent que mostra la segona la gràfica (2).

Y= -0,6752x + 0,6053 Pendent = 0,6752 Resistència = $\frac{1}{\text{Pendent}}$

Resistència = $\frac{1}{0{,}6752} = 1{,}48\Omega$

Conclusions:

Clarament es pot comprovar que les tres primeres hipòtesis sobre el comportament òhmnic de la cel·la s'han complert.

1) El resultat que mostra el gràfic (1) és aproximadament una recta, per tant, podem afirmar que el comportament de la cel·la és semblant al d'un generador convencional.
2) Hem pogut calcular la resistència interna de la cel·la, com es pot veure a l'apartat anterior.

En canvi, la hipòtesi 4 no s'ha complert. Després de consultar diversos llibres hem arribat a la següent conclusió.

3) Com es pot observar a la gràfica (1) el voltatge màxim aportat per la cel·la és de 0,92 V i no els 1,23 V que pensàvem. Aquest fet té una explicació similar a la del sobrepotencial que hem vist a l'experiència 2 en l'electrolitzador.

Els processos són els inversos als que succeeixen a l'el·lectrolitzador. En l'electròlisi de l'aigua cal aplicar com a mínim 1,23V encara que la tensió real és més alta " sobrepotencial ". En el cas d'una cel·la de combustible (cel·la galvànica) es genera menys tensió pel mateix motiu, això es degut al material dels elèctrodes, la resistència interna, la temperatura, i al volum d'hidrogen i oxigen subministrats.

La tensió sense càrrega és de 0,92V; aquesta tensió és coneix com a tensió de descàrrega, per analogia a una bateria. Aquesta tensió depèn especialment del volum i de la puresa dels gasos d'entrada.

Tampoc s'ha complert la hipòtesi 5:

4) Observant el gràfic (2) podem veure que la potència obtinguda és molt inferior a la potència donada pel fabricant en les característiques generals de la cel·la. Aquesta característica ens plantejarà un problema a l'hora de dissenyar la maqueta didàctica i intentar utilitzar l'energia aportada per la cel·la per alguna aplicació

3.2.4 Experiència 4 : Rendiment de la cel·la fotoelèctrica

Introducció:

El funcionament de les cel·les fotoelèctriques es basa en l'efecte fotovoltaic que es produeix quan la radiació solar incideix sobre un material semiconductor en el qual s'han creat artificialment dues regions, la tipus P (positiu) dopada amb quantitats molt petites d'algun element del grup 13 de la taula períodica i que contenen "forats" carregats positivament i la tipus N (negatiu), dopada amb quantitats molt petites d'algun element del grup 15 de la taula períodica que conté electrons addicionals. La unió d'aquests materials P i N, al ser exposada a la llum, genera un camp electrostàtic constant, el qual produeix un moviment d'electrons (corrent continu) que flueixen en tancar el circuit o quan s'hi aplica una càrrega externa.

Aquesta experiència consisteix a aplicar a les cel·les fotoelèctriques una font de llum que els proporcioni una intensitat de llum constant. Amb un sensor de llum sabrem la potència proporcionada per a la nostra font, i, de l'experiència 1, n'obtindrem la potència màxima de les cel·les. Aquest procés l'aplicarem a les dues cel·les que tenim en disposició.

Objectiu:

L'objectiu és determinar els rendiments de les cel·les amb les dades obtingudes. Aquesta dada ens permetrà determinar l'impacte que té aquest rendiment quan calcularem el rendiment total del procés en general. L'aplicació d'aquesta experiència a les dues cel·les ens permetrà saber si tenen rendiments semblants i, amb la comparació, evitar errors i veure quina és més eficient.

Hipòtesis:

I. El rendiment de la cel·la no serà aproximadament del 50%, ja que no aconseguirà captar tota la potència lumínica que li proporcionarem amb la font de llum artificial.

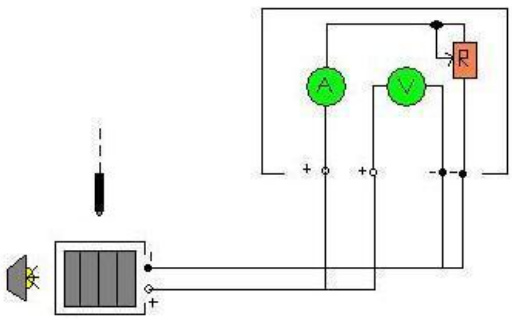
Material:

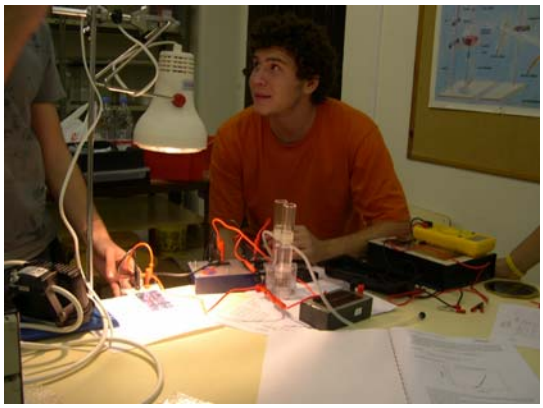
1.- Cel·la solar del kit
2.- Cel·la solar recoberta de resina epoxi
3.- Caixa de mesures
4.- Focus de llum
5.- Aigua destil·lada
6.- Cables de connexió

Procediment:

Hem situat la font de llum amb el suport de laboratori a uns 30 cm de la taula. Després de connectar-la hem posat el sensor de llum sobre la taula perquè realitzés la seva mesura. Amb aquesta dada i la màxima potència aportada per les dues cel·les, que hem obtingut de l'experiència 1, hem determinat el rendiment.

Connexions:





Treballant

Dades obtingudes:

Mesura de la intensitat lumínica amb el luxímetre:

Nº de mesura	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Mitjana**
Kilolux	26,3	17,6	18,5	17,4	12,3	18,4

- **Experiència 1:**

Potència màxima generada pel mòdul solar del kit:

Resistències (Ω)	**Intensitat (mA)**	**Voltatge (V)**	**Potència (mW)**
20	194 A	2,31 V	448,14

$2{,}31\ \text{V} \times 0{,}194\ \text{A} = 0{,}448\ \text{W}$

Potència màxima generada pel mòdul solar recobert de resina epoxi:

Resistències (Ω)	**Intensitat (mA)**	**Voltatge (V)**	**Potència (mW)**
3	467	1,75	817,25

$1{,}75\text{V} \times 0{,}467\text{A} = 0{,}814\text{W}$

Càlculs:

L'eficiència de la cel·la fotovoltaica es troba fent el quocient entre la potència captada per la cel·la i la potència donada per la cel·la. Per a mesurar la potència de llum que proporciona la nostra bombeta d'incandescència hem utilitzat un sensor de llum que expressa la quantitat de llum en lux. El lux, és la unitat internacional d'il·luminació, de símbol lx, equivalent a la il·luminació uniforme d'una superfície que rep el flux d'un lumen per cada m^2. I un lumen és la unitat internacional de flux lluminós, de símbol lm, equivalent al flux emès per un focus puntual d'una candela d'intensitat, dins un angle sòlid d'un estereoradiant. Experimentalment s'ha determinat que per a una bombeta d'incandescència d'aproximadament 100 W, 45 lux són l'equivalent a 1W/m^2. Per tant la potència proporcionada per la nostra font de llum ha estat la següent:

45 lux = 1W/m^2
18400 lux x (1W/m^2/45 lux) = 408,4 W/m^2

- **Cel·la solar del Kit:**

Superfície de captació 0,085 m × 0,05 m = 0,004 m2

Potència captada = $0{,}004\ \text{m}^2 \times (408{,}4\ \text{W/m}^2) = 1{,}63\ \text{W}$

Potència màxima aportada = 0,44814 W

$$\text{Rendiment} = \frac{0{,}448\ \text{W}}{1{,}63\ \text{W}} = 24{,}6\%$$

- **Cel·la solar recoberta de resina epoxi (cel·la circular):**

Superfície circular de captació = $(0{,}05)^2$ m $\times$ π = 0,00785 m^2

Potència captada = 0,00785 m^2 $\times$ (408,4 W/m^2) = 3,2 W

Potència màxima aportada = 0,81725 W

$$\text{Rendiment} = \frac{0{,}817\ \text{W}}{3{,}2\ \text{W}} = 25{,}5\%$$

Conclusions:

El rendiment típic d'una cel·la fotovoltaica típic varia entre el 5% de la primera generació fins a més del 25% en condicions de laboratori. Aquestes dades però varien depenent del material de què està constituïda la cel·la. Per a una cel·la de silici, com les nostres, el rendiment aproximat és d'un 25%, per tant els resultats obtinguts són correctes.

3.2.5 Experiència 5: Eficiència de Faraday (eficiència elèctrica de l'electrolitzador)

Introducció:

Aquesta experiència consisteix a observar el procés de producció d'hidrogen dins l'electrolitzador. L'electricitat serà aportada per una cel·la fotoelèctrica de la qual mesurarem el voltatge i la intensitat. Durant aquest procés, el que estarà succeint serà la conducció de càrregues elèctriques a través de l'aigua. Les sals, els àcids i les bases dissoltes en aigua s'ionitzen parcialment o totalment i com a conseqüència condueixen el corrent elèctric: són electròlits. En col·locar un electròlit en una cel·la electrolítica (com el nostre electrolitzador) i connectar els elèctrodes a un generador de corrent continu, s'origina un camp elèctric en la dissolució, per l'acció del qual, si el voltatge és l'adequat, els ions positius (cations) es dirigeixen cap a l'elèctrode negatiu (anomenat, en l'electròlisi, càtode), mentre que els negatius (anions) es dirigeixen cap a l'elèctrode positiu (anomenat ànode).

En la solució hi ha, doncs, un doble moviment d'ions que constitueix el corrent elèctric en la dissolució. Aquest tipus de conductivitat elèctrica s'anomena conductivitat electrolítica. Aquesta conductivitat és deguda a la llibertat de moviment que tenen ions, ja que poden desplaçar-se cap a l'elèctrode corresponent. Aquesta conductivitat ve acompanyada de reaccions químiques a la superfície submergida dels elèctrodes. Aquest pas del corrent s'anomena electròlisi. En el cas de l'electròlisi de l'aigua, les reaccions que succeeixen als elèctrodes i que generen hidrogen i oxigen són les següents

Al càtode poden tenir lloc les següents reaccions de reducció:

Reducció de l'aigua i obtenció d'hidrogen, que es desprèn a l'elèctrode:

$$2H_2O_{(l)} + 2e^- \rightarrow 2OH^-_{(aq)} + H_{2(g)}$$

Reducció de l'ió oxoni a hidrogen:

$$2H_3O^+_{(aq)} + 2e^- \rightarrow 2H_2O_{(l)} + H_{2(g)}$$

A l'ànode poden tenir lloc les següents reaccions d'oxidació:

Oxidació de l'aigua i obtenció d'oxigen:

$$2H_2O_{(l)} \rightarrow 4H^+_{(aq)} + O_{2(g)} + 4e^-$$

Oxidació de l'ió hidròxid i obtenció d'oxigen:

$$2OH^-_{(aq)} \rightarrow 2H_2O_{(l)} + O_{2(g)} + 4e^-$$

Objectius:

L'objectiu d'aquesta experiència és, essencialment, estudiar el procés d'electròlisi trobant el rendiment. Amb les dades que prendrem de l'experiència, calcularem el nombre d'electrons aportats per la cel·la fotoelèctrica per a la realització de l'electròlisi. Utilitzant el nombre d'electrons aportats per la cel·la, podrem saber el volum teòric que hauria d'haver generat l'electrolitzador. Fent el quocient entre el volum generat, que restarà a l'electrolitzador, i el volum teòric calculat podrem determinar el rendiment de Faraday o elèctric, utilitzant la constant determinada per Faraday.

Hipòtesis:

II. El rendiment elèctric de l'electrolitzador serà alt, ja que pensem que el corrent que passa per la dissolució s'utilitzarà majoritàriament en alliberar hidrogen i oxigen.
III. No esperem que succeeixin altres reaccions que facin disminuir el rendiment.

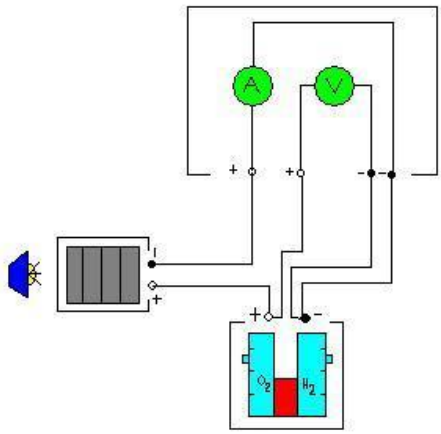
Material:

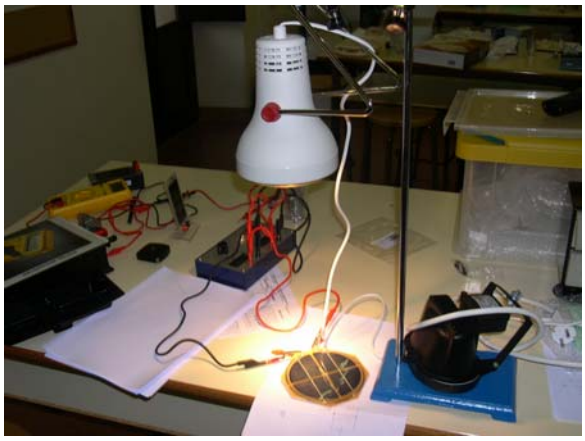
1.- Cel·la solar recoberta de resina epoxi
2.- Caixa de mesures
3.- Electrolitzador PEM
4.- Focus de llum
5.- Aigua destil·lada
6.- Cables de connexió

Procediments:

Hem connectat la cel·la fotoelèctrica a l'electrolitzador ple d'aigua destil·lada i hem mesurat, amb la caixa de mesures, el voltatge i la intensitat del circuit abans esmentat. També hem mesurat durant 180 segons el volum d'hidrogen generat. A partir d'aquestes dues dades, hem pogut obtenir el nombre de coulombs gastats per l'electrolitzador i el nombre de coulombs que pot donar el volum d'hidrogen generat. Amb això hem realitzat el rendiment elèctric de l'electrolitzador.

Connexions:





Preparant el muntatge

Dades obtingudes:

Hem realitzat dues proves observant el procés d'electròlisi durant 180 segons, per a comprovar que els resultats obtinguts no són erronis ni estan alterats per cap factor.

Taula de mesures		
	Prova 1	***Prova 2***
Temps:	180s	180s
Voltatge (V)	1,63 V	1,64 V
Intesitat (I)	278 mA	280 mA
Volum	7 ml	7 ml

Càlculs:

Càlcul de l'eficiència de Faraday (elèctrica) de l'electrolitzador

L'eficiència de Faraday es troba a partir del volum d'hidrogen recollit experimentalment i del volum d'hidrogen teòric obtingut .

Rendiment = Volum H_2 experimental / Volum H_2 teòric.

El volum d'hidrogen teòric pot calcular-se, d'acord amb la 2ª Llei de Faraday, seguint les següents operacions, utilitzant la contant de Faraday.

96484 Coulombs = 1mol d'electrons

El coulomb, de símbol C, és la unitat del càrrega elèctrica al sistema internacional. És una unitat derivada que es defineix en termes de l'ampere: 1 coulomb és la quantitat de càrrega total elèctrica que passa per un conductor pel qual circula un corrent elèctric d'un ampere durant un segon.

1) $C = I \times t =$ Amper $\times$ segon $=$ Coulomb
0,280 A $\times$ 180s = 50, 4 C

2) Càlcul dels mols d'hidrogen teòrics tenint en compte el corrent que ha circulat per l'aigua.

La reacció és la següent:

Ànode: $H_2O \rightarrow O_2 + 2\ H^+$
Càtode: $2e^- + 2\ H^+ \rightarrow H_2$
Total: $H_2O \rightarrow ½\ O_2(g) + H_2$

Per tant:

$$\text{Coulombs} \times \frac{1\text{mol electrons}}{96484\ \text{C}} \times \frac{1\ \text{mol}\ H_2}{2\ \text{mols d'electrons}} = \text{mols}\ H_2$$

$$50{,}40\ \text{C} \times \frac{1\text{mol electrons}}{96484\ \text{C}} \times \frac{1\ \text{mol}\ H_2}{2\ \text{mols d'electrons}} = 2{,}61 \times 10^{-4}\ \text{mols de}\ H_2.$$

3) Aplicant l'equació dels gasos podem trobar el volum teòric de l'electrolitzador. La pressió al lloc on ens trobàvem l'hem obtingut amb un baròmetre.

Pressió = 961×10^2 Pascals Temperatura =19,5 ºC (292,5 K)

$$\frac{n \times R \times T}{P} = V; \quad \frac{2{,}61 \times 10^{-4} \times 8.31 \times 290{,}5}{961 \times 10^2} = 6{,}6 \times 10^{-6} m^3 = 6{,}6\ cm^3$$

4) Comparant el volum teòric amb el volum obtingut, hem pogut veure que, sorprenentment, el volum obtingut és superior al teòric. Cal destacar que encara que és pot mesurar, el volum d'hidrogen de l'electrolitzador, aquesta mesura no és gaire fiable ja que es realitza a ull. També cal dir que l'escala és de 1 ml, per tant hi pot, haver un error de ± 0,5 ml. És per això que el volum obtingut anteriorment que era aproximadament de 7 ml, podria ser de 6,5 ml o de 7, ml.

Rendiment = Volum H_2 experimental / Volum H2 teòric

7 ml ± 0,5 / 6,6 ml = **1 aproximadament.**

Conclusions:

L'eficiència de Faraday de l'electrolitzador expressa quant corrent s'ha transformat en la reacció desitjada. En els electrolitzadors comercials, l'eficiència de Faraday ha d'apropar-se al 100%. Si l'eficiència de Faraday fora molt menor que 1, significaria que s'estan produint reaccions secundaries en el sistema (corrosió). Això suposaria un gran desavantatge, ja que no només la vida de l'electrolitzador seria més curta, sinó que a més es precisaria de major despesa d'energia. Finalment podem dir que les nostres hipòtesis s'han complert.

3.2.6 Experiència 6: Rendiment de la pila d'hidrogen

Introducció:

El funcionament d'una pila de combustible de polímer de membrana, com la que estem estudiant, es basa en dues reaccions simultànies: una d'oxidació (pèrdua d'electrons) a l'ànode i una altre de reducció (guany d'electrons) al càtode. Aquestes dues reaccions permeten una reacció d'oxidació-reducció (redox) total que permet la formació d'aigua a partir d'oxigen i hidrogen gas amb l'obtenció d'energia elèctrica.

Les reaccions abans esmentades són les següents:

Reacció d'oxidació: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$

Reacció de reducció: $O_2 + 4e^- + 4H^+ \rightarrow H_2O$

Reacció total: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

En l'ànode, les molècules d'hidrogen entren contacte amb un catalitzador de platí que es troba en la superfície de l'elèctrode. Les molècules d'hidrogen es trenquen i s'enllacen dèbilment amb el platí de la superfície de l'elèctrode (H-Pt), iniciant-se així la reacció d'oxidació. Tot seguit, l'hidrogen allibera el seu únic electró que viatjarà pel circuit extern de la pila cap al càtode. La resta de protons lliures presents en la superfície de l'elèctrode s'uneixen a l'aigua per formar ió hidroni (H_3O^+), que es desplaçarà cap al càtode a través de la membrana (electròlit sòlid), deixant lliure el catalitzador de platí per a la pròxima molècula d'hidrogen.

En el càtode, les molècules d'oxigen entren en contacte amb el catalitzador de platí de la superfície de l'elèctrode. Les molècules d'oxigen es trenquen formant enllaços dèbils amb el platí (O-Pt), iniciant-se així la reacció de reducció. Cada un dels oxígens atòmics s'alliberen del platí per unir-se amb dos electrons (que han viatjat a través del circuit extern) i dos protons (que han viatjat a traves de la membrana) per formar la molècula d'aigua. En aquest moment la reacció redox s'ha completat. El catalitzador de platí en l'elèctrode del càtode torna a estar lliure per a la pròxima molècula d'oxigen.

Aquesta experiència consisteix a connectar la pila a un circuit on faci de generador i fer-la treballar durant un temps, aplicant-li una càrrega externa, mesurant el volum d'hidrogen consumit i la intensitat i el voltatge del circuit.

Objectiu:

L'objectiu d'aquesta experiència és trobar el rendiment de la pila d'hidrogen i estudiar la reacció que te lloc dins la pila. Amb la comparació dels electrons teòricament aportats pel volum d'hidrogen gastat i els electrons generats per la pila, podrem determinar el rendiment elèctric de la pila. Aquesta dada ens servirà en el futur per a dissenyar la maqueta didàctica, utilitzant la constant de Faraday.

Hipòtesis:

I. El rendiment de la pila ha de ser bastant alt, però inferior a 1.
II. El rendiment serà bastant semblant al de l'electrolitzador atès que les reaccions que succeeixen a l'interior de la pila són les inverses a les de l'electròlisi.

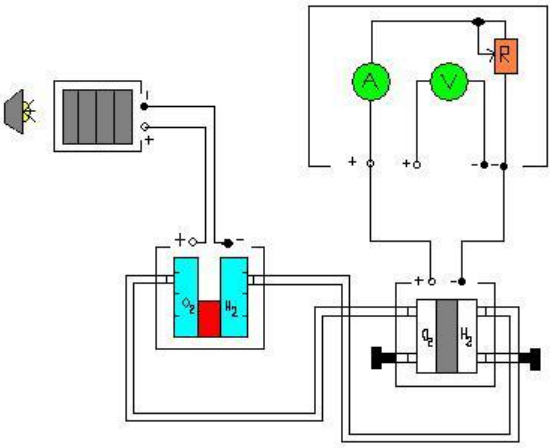
Material:

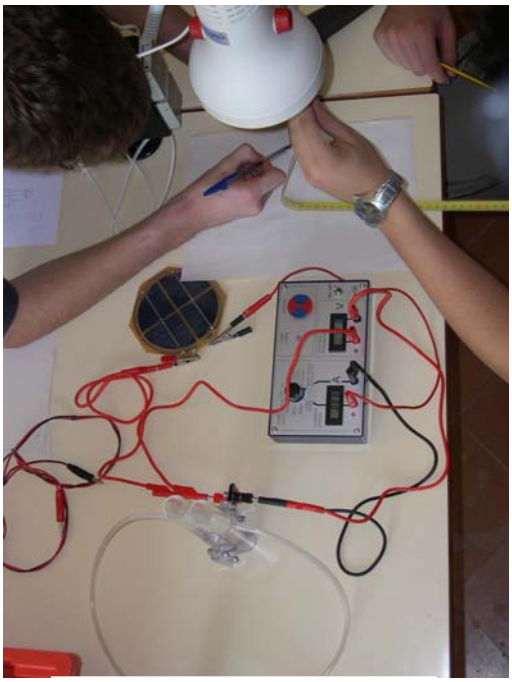
1.- Cel·la solar recoberta de resina epoxi
2.- Caixa de mesures
3.- Electrolitzador PEM
4.- Focus de llum
5.- Aigua destil·lada
6.- Cables de connexió

Procediments:

Primerament hem connectat la cel·la fotoelèctrica a l'electrolitzador, ple d'aigua destil·lada, per tal de produir una quantitat suficient d'hidrogen que ens permetés realitzar l'experiència correctament. Seguidament hem connectat electrolitzador a la pila. També hem connectat la pila a un circuit i a la caixa de mesures, del kit, per tal de llegir les mesures de voltatge i intensitat, però no li hem aplicat cap càrrega al circuit. Quan la pila ha arribat a aportar el voltatge màxim, aproximadament 0,90V, li hem aplicat una càrrega de 3 Ω durant 2 minuts i 13 segons. A partir d'aquestes dades hem pogut calcular les càrregues aportades pel volum de gas gastat i les càrregues aportades per la pila. Així hem calculat el rendiment elèctric.

Connexions:





Connectant tots els elements

Dades obtingudes:

Volum de H_2	Temps	Pèrdues de H_2
3 ml	133 s	0,4 ml/min

Observant el volum d'hidrogen emmagatzemat a l'electrolitzador sense produir ni gastar hidrogen, hem determinat que el dipòsit perd aproximadament un volum de 0,4 mil·lilitre per minut. Això és degut a les juntes de connexió amb els tubs que condueixen l'hidrogen a la pila.

Càlculs:

Càlcul de l'eficiència de Faraday (elèctrica) de la pila.

L'eficiència de Faraday es troba fent el quocient entre la càrrega elèctrica teòrica aportada pel volum d'hidrogen consumit per la pila i el nombre de carregues proporcionades per la pila.

Rendiment = Càrrega elèctrica teòrica del volum H_2 consumit/Càrrega elèctrica aportada per la pila.

El nombre de càrregues elèctriques teòriques aportades pel volum d'hidrogen consumit, es pot calcular utilitzant la 2ª Llei de Faraday, seguint les següents operacions, utilitzant la contant de Faraday.

96484 Coloumbs = 1mol d'electrons

1) Primerament restarem les pèrdues d'hidrogen, que té l'electrolitzador, de l'hidrogen gastat. Aquesta dada, l'hem obtingut observant la disminució del volum d'hidrogen creat sense generar-ne i gastar-ne.

Volum H_2 gastat	Volum H_2 perdut	Volum H_2 final
3 ml	0,85 ml	2,15 ml

2) Després hem calculat el nombre de mols continguts als volum d'hidrogen gastat

Pressió = $985{,}30 \times 10^2$ Pascals Temperatura =15,5º C (288,5 K)

$$\frac{P \times V}{R.T} = n \; ; \qquad \frac{2{,}15 \times 10^{-6}\, 985{,}30 \times 10^{2}}{8{,}31 \times 288{,}5} = 8{,}838 \times 10^{-5} \text{ mols } H_2$$

I el nombre de càrregues teòriques aportades per a aquest volum, basant nos en les reaccions abans esmentades:

Ànode: $H_2O \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2e^-$
Càtode: $2e^- + 2 H^+ \rightarrow H_2$
Total: $H_2O \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + H_2$

$$8{,}838 \times 10^{-5} \text{ mols } H_2 \times \frac{2 \text{ mols d'electrons}}{1 \text{ mol } H_2} \times \frac{96484 \text{ C}}{1\text{mol electrons}} = 17{,}05 \text{ Coulombs}$$

3) A partir de la intensitat i el temps de funcionament de la pila es pot determina el nombre de càrregues aportades per la pila.

$Q = I \times t = 0{,}118 \text{ A} \times 133\text{s} = 15{,}69$ Coulombs

4) El rendiment serà:

$$\text{Rendiment} = \frac{\text{Càrregues aportades per la pila}}{\text{Càrregues teòriques del volum } H_2 \text{ consumit}}$$

$$\text{Rendiment} = \frac{15{,}69 \text{ C}}{17{,}05 \text{ C}} = 0{,}9202 = 0{,}92\%$$

El rendiment total de la pila és de 92%.

Conclusions:

Primerament hem de dir que la primera hipòtesis que hem plantejat s'ha complert, com era d'esperar. Per explicar el motiu pel qual no s'ha complert la segona hipòtesis hem trobat les raons següents:

1. Per començar cal dir que hi ha reaccions electroquímiques paral·leles que subministren un número més petit d'electrons per a un mateix volum d'hidrogen consumit.
2. El rendiment de la pila és menor a 1 a causa que hi ha una reacció química entre l'hidrogen i l'oxigen (oxidació/ combustió catalítica).
3. Es produeix una recombinació d'hidrogen i oxigen o difusió a causa del volum que es perd.

3.2.7 Experiència 7: Rendiment cel·la fotoelèctrica – pila d'hidrogen

Introducció:

Durant la realització d'aquesta experiència volem reproduir un sistema de producció i de consum d'hidrogen. Si en el futur l'hidrogen es converteix en el veritable successor dels hidrocarburs aquests sistemes seran molt emprats. Un exemple clar el podem trobar en la instal·lació que BP té a les cotxeres de Barcelona per subministrar hidrogen als autobusos, que com el muntatge següent, aprofita l'energia fotovoltaica per a realitzar l'electròlisi i obté energia elèctrica mitjançant piles de tipus PEM als autobusos.

Aquesta experiència consisteix a connectar tot el sistema, des de la cel·la fotoelèctrica fins a la pila d'hidrogen, i mesurar la potencia proporcionada per la font de llum i la potencia aportada per la pila.

Objectiu:

L'objectiu principal d'aquesta experiència és fer una valoració d'un sistema de producció d'hidrogen i obtenció d'energia. Per calcular el rendiment ho farem comparant la potència proporcionada per la font de llum, que haurem llegit amb un sensor, i la màxima potència de la pila, que obtindrem de l'experiència 3, la corba característica de la pila.

Hipòtesis:

I. El rendiment del conjunt ha de ser més petit que 1.
II. El rendiment serà molt més petit que els rendiments de l'electrolitzador i la pila per separat, ja que la cel·la fotoelèctrica té un rendiment molt més baix.

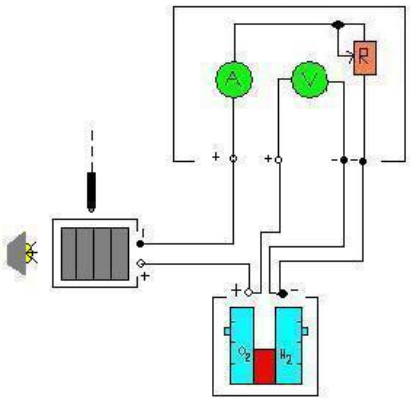
Material:

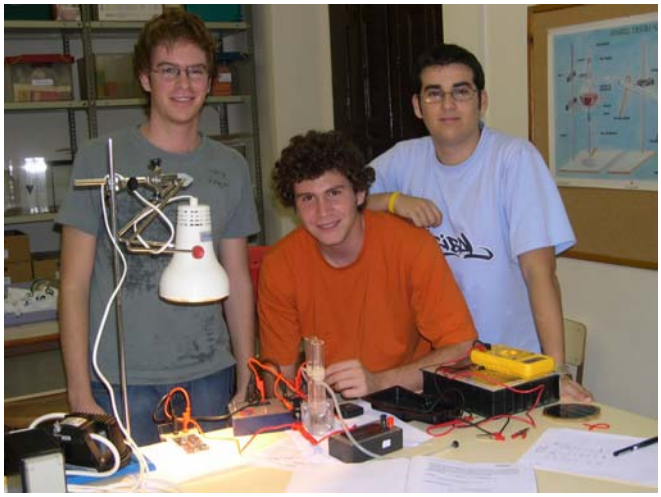
1.- Cel·la solar recoberta de resina epoxi
2.- Caixa de mesures
3.- Electrolitzador PEM
4.- Focus de llum
5.- Aigua destil·lada
6.- Cables de connexió

Procediment:

Aquesta experiència, l'hem realitzat connectant tot el sistema, de la cel·la fotoelèctrica fins a la pila d'hidrogen. Fent el quocient entre la potencia de llum que proporciona la nostra font i la potència màxima que proporciona la nostra pila, hem obtingut el rendiment total.

Connexions:





Preparats per a realitzar l'experiència

Dades obtingudes:

Hem mesurat amb un tester les intensitats i els voltatges que proporcionen la cel·la fotoelèctrica i amb el mesurador de la intensitat lumínica els lux que donen.

	Intensitat (A)	Voltatge (V)	Intensitat lumínica (lux)
Cel·la fotoelèctrica	0,149	0,66	18600

Superfície de captació la cel·la fotoelèctrica $(0{,}05\text{m})^2 \times \pi = 0{,}00785\ \text{m}^2$

Càlculs:

L'eficiència de la cel·la fotovoltaica es troba fent la divisió entre la potencia captada per la cel·la per la potencia donada per la cel·la.

Experimentalment s'ha determinat que per a una bombeta d'incandescència d'aproximadament 100 W, 45 lux* són el equivalent a 1W/m^2. Per tant la potencia proporcionada per la nostra font de llum és la següent:

$$45\ \text{lux} = 1\text{W/m}^2$$

$$18400\ \text{lux} \times \frac{1\text{W}}{1\text{m}^2 \times 45\ \text{lux}} = 408{,}4\ \text{W/m2}$$

1) Potencia captada

$$P = S.I = 0{,}00785.408{,}4 = 3{,}2W$$

2) Potència aportada per la pila :

$$P = I.V = 0{,}149.0{,}66 = 0{,}09889W$$

3)

$$\text{Rendiment} = \frac{\text{Potència aportada per la pila}}{\text{Potència captada per la cel.la fotovoltaica}}$$

$$\eta = \frac{0{,}09889}{3{,}2} = 0{,}03090 = 3{,}1\%$$

η = 3,1%

*L'Explicació d'aquesta unitat la podeu trobar a l'experiència 4

Conclusions:

Com ja hem dit, el rendiment d'una cel·la fotovoltaica típica varia entre el 5% a la primera generació fins a més del 25% en condicions de laboratori. Aquestes dades poden ballar depenent del tipus de pila i també de material amb què està fabricada. Clarament es pot veure que les dues hipòtesis, no gaire agosarades, s'han complert, encara que no ens esperàvem un rendiment tant baix, aquesta dada és pot justificar per la baixa eficiència de la cel·la fotoelèctrica. Aquest inconvenient, com és el baix rendiment de la cel·la, pot repercutir en les futures instal·lacions de producció d'hidrogen augmentant la superfície de captació i el cost.

3.2.8 Experiència 8: Rendiment conjunt electrolitzador – cel·la d'hidrogen

Introducció:

Ens hem plantejat fer aquesta última experiència després de veure els resultats de l'ultima que vàrem realitzar, l'experiència 7. Vam quedar molt parats del baix rendiment que va mostrar tot el conjunt. Aquesta experiència, per tant, és una variació de l'altra, ja que el sistema que reproduirem serà el mateix, però amb una petita variació respecta les dades que prendrem. En l'experiència anterior hem agafat com a potència captada, la potència que per superfície hauria de captar la cel·la fotovoltaica. En aquesta, en canvi, obtindrem la potencia captada de la multiplicació dels volts i els ampers del circuit que aporta energia a l'electrolitzador per a fer l'electròlisi.

Aquesta experiència consisteix en la connexió de tot el sistema, però prenent dades diferents a les de l'experiència anterior. Mesurant el voltatge i la intensitat aportades per la cel·la fotoelèctrica per tal de saber la potencia que gastem i la intensitat i el voltatge màxim aportats per la cel·la per a saber el rendiment (no elèctric) electrolitzador cel·la.

Objectiu:

L'objectiu d'aquesta experiència és trobar el rendiment del conjunt electrolitzador i la cel·la d'hidrogen. Ho podrem determinar amb la comparació de la potencia aportada per la cel·la fotoelèctrica i la màxima potència aportada per la cel·la.

Els sistemes de producció d'hidrogen poden prendre l'energia de moltes fonts, no solament la solar, sinó també l'eòlica o de la mateixa xarxa de distribució. Per tant, voldríem saber el rendiment d'un sistema de producció d'hidrogen i d'obtenció d'energia a partir d'aquest que no resulti influenciat pel rendiment del generador, com en el cas anterior la cel·la fotovoltaica.

Hipòtesis:

I. El rendiment del conjunt ha de ser més petit que 1.
II. El rendiment d'aquest conjunt serà superior al rendiment obtingut a l'experiència anterior encara que no serà igual al rendiment elèctric de l'electrolitzador i de la cel·la.

Material:

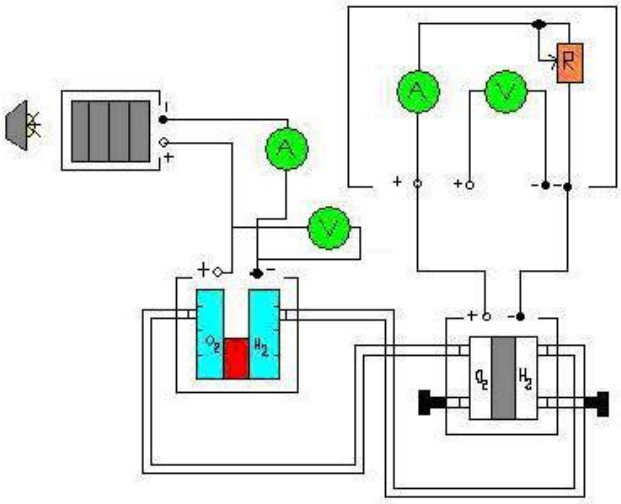
1.- Cel·la solar recoberta de resina epoxi
2.- Caixa de mesures
3.- Electrolitzador PEM
4.- Focus de llum
5.- Aigua destil·lada
6.- Cables de connexió

Procediments:

Hem connectat tot el sistema i la cel·la a un circuit sense càrrega externa fins que aquesta ha mostrat el màxim voltatge. Seguidament li hem aplicat una resistència de 3 Ω, ja que hem determinat a l'experiència 3 que amb aquesta resistència és quan la cel·la treballa a més potència.

Mitjançant la caixa de mesures hem obtingut el voltatge i la intensitat proporcionades per la cel·la fotoelèctrica i el voltatge i la intensitat proporcionades per la cel·la. Fent el quocient entre la multiplicació d'aquestes dues dades hem obtingut el rendiment del conjunt.

Connexions:



Dades obtingudes:

Hem mesurat amb la caixa de mesures les intensitats i els voltatges que proporcionen la cel·la fotoelèctrica i la cel·la d'hidrogen i hem obtingut les dades següents:

	Intensitat (A)	Voltatge (V)
Cel·la d'hidrogen	0,149	0,66
Cel·la fotoelèctrica	0,227	1,60

Càlculs:

Primer de tot per obtenir el rendiment del conjunt calcularem la potència que ens proporciona la cel·la fotoelèctrica i la cel·la d'hidrogen mitjançant la fórmula de la potència ($P = I \cdot V$).

1) Potència cel·la fotoelèctrica = $P = I \times V$
$0{,}227\ A \times 1{,}6\ V = 0{,}36W$

2) Potència cel·la d'hidrogen = $P = I \times V$
$0{,}149\ A \times 0{,}66\ V = 0{,}09889W$

Ara calcularem el rendiment dividint la potència aportada per la cel·la d'hidrogen entre la potencia aportada per la cel·la fotovoltica.

3)

$$\text{Rendiment} = \frac{\text{Potència aportada per la pila}}{\text{Potència aportada per la cel·la fotovoltaica}}$$

$$\eta = \frac{0{,}09889}{0{,}36} = 0{,}275 = 27{,}5\%$$

$$\boldsymbol{\eta = 27{,}5\%}$$

Conclusions:

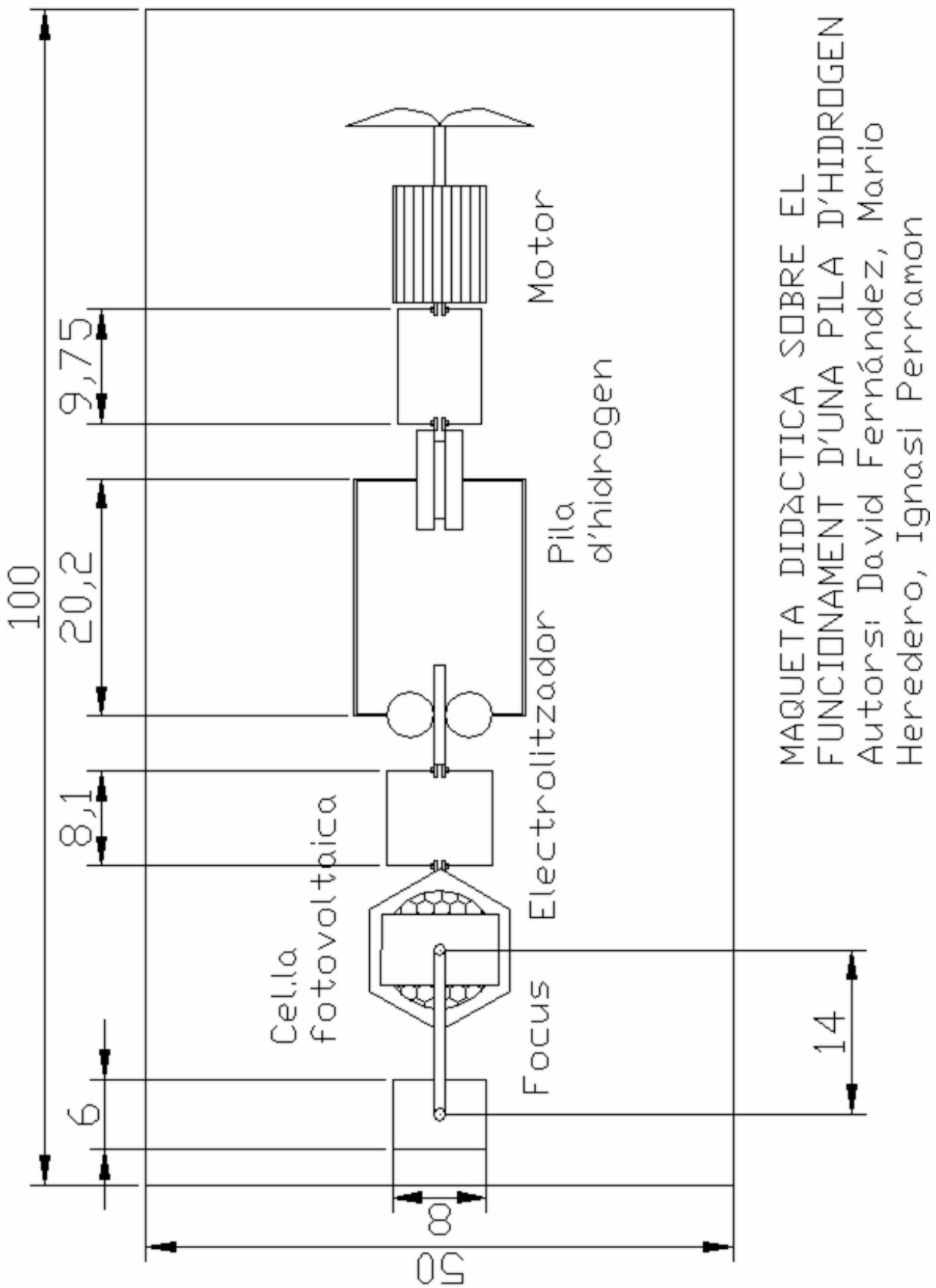
El rendiment conjunt electrolitzador – cel·la d'hidrogen obtingut és bastant petit. Això és degut a diverses causes que es podem explicar de la següent manera

1) L'eficiència, no elèctrica, varia amb la tensió. A mesura que s'eleva la tensió, la quantitat d'hidrogen generat a l'electrolitzador augmenta, però l'eficiència disminueix. Per tant, no podem comparar els rendiments trobat a les experiències 5 i 6 amb aquest, ja que aquests eren rendiments elèctrics que són diferents dels rendiments obtinguts a partir d'energies o potències.
2) Un altre dels fets que pot fer disminuir el rendiment són les petites fuites de gas que hi ha en les connexions amb els tubs de goma de electrolitzador. Aquestes fuites provoquen una pèrdua d'hidrogen que no és aprofitat a la cel·la, per tant es perd tota l'energia que aportaria aquest hidrogen.

Basant-nos en el primer punt de les conclusió hem d'esmentar que per a futurs centres de producció, haurà de trobar-se el punt òptim de funcionament per cada electrolitzador. El rendiment haurà de ser el màxim per instal·lacions que utilitzin com a font d'energia elèctrica la xarxa, ja que un consum elevat faria augmentar els costos.

4. Disseny de la maqueta didàctica sobre el funcionament d'una pila d'hidrogen

ESCALA 1:5


100
9,75
20,2
8,1
6
50
8
14
Motor
Pila
d'hidrogen
Electrolitzador
Cel.la
fotovoltaica
Focus
MAQUETA DIDÀCTICA SOBRE EL
FUNCIONAMENT D'UNA PILA D'HIDROGEN
Autors: David Fernández, Mario
Heredero, Ignasi Perramon

Tot seguit s'especifica els materials i el procediment per poder construir la maqueta didàctica on es podrà veure el procés de generació d'electricitat a partir de la placa fotoelèctrica i la pila d'hidrogen.

Material necessari per a la construcció de la maqueta didàctica

- Taulell de conglomerat de com a mínim 3 cm de gruix
- Kit complet de la pila (electrolitzador, pila d'hidrogen, connectors, stopers, molí elèctric.)
- Plaques de metacrilat
- Placa fotoelèctrica
- Focus al·logen

Procediment de muntatge

Primer de tot s'ha de tallar el taulell de fusta*, i llimar la zona tallada i els laterals per tal que no surtin petites estelles que puguin ser perilloses. Tot seguis s'ha de tallar lamines rectangulars de metacrilat per tal de que faci de suport per a tots els elements. Aquesta tasca pot ser realitzada per una empresa o taller que treballin amb aquest material.

Tot seguit es disposen els suports de cada element del Kit per tal de que es puguin fixar amb algun adhesiu plàstic al taulell. Un cop ajustats els elements es fan les connexions pertinents placa fotoelèctrica – electrolitzador, electrolitzador – pila, pila – molí elèctric. També cal segellar amb silicona totes les connexions dels tubs per on circularà l'hidrogen i l'oxigen ja que, principalment l'hidrogen, a causa de la baixa densitat que té s'escola per qualsevol obertura.

Per acabar es cargola i ajusta el focus al·logen enfocat verticalment a sobre de la placa fotoelèctrica. Per veure el procés en marxa s'ha de subministrar aigua destil·lada als dipòsits de l'electrolitzador, tapar les sortides de gas laterals de la pila d'hidrogen i connectar els focus al corrent elèctric.

* (les dimensions i la disposició del muntatge està detallat en el croquis del muntatge, adjuntat en el treball)

5. Valoració de l'energia de l'hidrogen

5. VALORACIÓ DE L'ENERGIA DE L'HIDROGEN

La finalitat d'aquest treball ha estat la d'adquirir una visió general sobre hidrogen i hem arribat a la conclusió que, avui dia, aquest element es planteja com un dels possibles substituts als hidrocarburs en àmbits com l'automoció o la generació d'energia distribuïda.

Després de realitzar l'estudi d'aquest element, principalment centrat en les capacitats energètiques que presenta i en l'experimentació amb una cel·la d'hidrogen, creiem que estem en disposició de fer una valoració global d'aquest vector energètic. Per realitzar-la, l'hem dividit en els diferents punts que hem esmentat al nostre treball.

Valoració dels diversos aspectes del treball:

Obtenció de l'hidrogen:

En aquest apartat hem pogut veure la gran varietat de sistemes de producció de l'hidrogen que es poden classificar bàsicament en dos, segons estiguin o no basats en energies renovables. Cal realitzar aquesta divisió, ja que molts col·lectius presenten l'hidrogen com una alternativa neta als hidrocarburs, però, com hem dit a la introducció, l'hidrogen no és una font d'energia sinó un vector energètic. Per tant, si es vol anomenar com una alternativa neta als hidrocarburs, s'ha de basar la producció d'aquest element en els processos lliures de CO_2, com pot ser l'electròlisi, a partir d'energies renovables o els processos biològics: fermentació, pirròlisi, o obtenció a partir d'algues o cianobacteries. D'aquests dos processos, l'electròlisi es planteja com un dels camins més prometedors a curt i mitjà termini, ja que és un procés relativament senzill de portar a terme. Actualment només es produeix un 4% de l'hidrogen utilitzant aquests procediment; això és degut al preu elevat de l'electricitat, però el futur passa perquè els costos es vagin reduint quan les fonts d'obtenció d'electricitat siguin energies renovables més barates i estiguin generalitzades. Un exemple estaria en la utilització d'energia provinent de fonts renovables com l'eòlica o la fotovoltaica per a l'electròlisi. En aquest procés es podria aprofitar les fases de forta producció elèctrica (estiu, èpoques de forts vents, pluges, etc) per produir hidrogen.

Emmagatzemament de l'hidrogen:

Els sistemes d'emmagatzemament de l'hidrogen es poden dividir en dos àmbits. Els que van destinats a la indústria automobilística i els que s'utilitzarà en una possible xarxa mundial de l'hidrogen. Encara que fem una distinció, els sistemes es basen en els mateixos processos. Actualment els dos sistemes més utilitzats, en els dos àmbits, són els que fan servir altes pressions i els que liqüen l'hidrogen. Referent al primer procés, es podria millorar la capacitat i disminuir l'espai ocupat pels recipient, augmentant la pressió, però això augmentaria els costos. D'altra banda, el problema de l'hidrogen liquat és el gran consum d'energia que representa el procés de liqüefacció. Però també hi ha altres vies com els dels hidrurs metàl·lics, que són una altre opció, encara que els que s'han desenvolupat treballen a temperatures relativament altes 250 ºC. Actualment s'estan investigant nous hidrurs que millorin el procés d'alliberació d'hidrogen convertint-lo en un procés reversible, en condicions de pressió i temperatura moderades, barat, segur, estable i amb una alta capacitat d'absorció.

Una altra opció que caldria esmentar seria els nanotubs o el grafit però, malgrat que aquests materials han despertat moltes expectatives per les seves bones característiques, tant en els sistemes d'absorció i alliberació i també en l'àmbit de la seguretat, encara es troben en fase de desenvolupament i els costos són relativament elevats.

Altres sistemes que es troben en fase de desenvolupament són els hidrurs de barreges i les microesferes de vidre. Referent als hidrurs de barreges, aquest encara presenten una vida útil limitada i els períodes de carrega - descarrega són massa lents. En el segons sistema esmentat, les microesferes de vidre, es presenta com un sistema molt segur però les temperatures d'absorció són relativament altes, entre 200ºC a 400ºC.

Transport

Pel que fa al transport de l'hidrogen, la majoria dels sistemes estan en procés d'investigació, encara que els més utilitzats actualment són el transport d'hidrogen en forma gasosa o en forma líquida. El transport està estretament lligat a l'emmagatzemament de l'hidrogen.

Pel que fa al transport d'hidrogen en forma gasosa, es planteja la utilització d'un sistema similar al del transport de gas natural pels gasoductes, però s'haurien de modificar els actuals de gas natural ja que el transport de l'hidrogen requereix pressions més altes. L'altra opció és el transport d'hidrogen en estat líquid. Actualment moltes fàbriques estan utilitzant aquesta tècnica, però és molt complexa, ja que es necessiten grans pressions per liquar l'hidrogen, es perd gran part del seu potencial energètic en el procés i els costos són elevats. Només presenta un únic avantatge, que és el fet que es pot transportar grans quantitats en menys espai.

La millora dels sistemes d'emmagatzemament possibilitarà una millora en el transport d'aquest element de forma que s'utilitzi un sistema viable econòmicament i segur.

Les piles d'hidrogen

A la pregunta, que es formula molta gent: Surt a compte utilitzar les piles de combustible?. La nostra resposta és que sí, sempre que no s'inventi una bateria que sigui capaç d'emmagatzemar molta energia. Mentre això no passi, les piles d'hidrogen continuaran essent i seran una alternativa per al transport d'energia i l'aprofitament en cotxes i en àmbits domèstics.

Sobre totes les piles de combustible, en destaca una per les seves qualitats i prestacions, és la pila tipus PEM o PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). La característica que més destaca en aquesta pila, i una de les que tenen més importància a l'hora de descriure un generador, és el rendiment. Aquesta pila presenta el rendiment més alt de totes les altres piles que s'esmenten en el treball. També presenta altres qualitats que la fan la més adequada per a la utilització en automòbils, com pot ser el fet que funcionen a baixa temperatura i són relativament fàcils de fer funcionar. Un exemple clar són els autobusos Mercedes-Benz que circulen actualment per Barcelona i que utilitzen aquesta mateixa pila.

Creiem que aquest tipus de tecnologia serà utilitzada en el futur en cotxes principalment, ja que, com hem dit abans, el seu rendiment supera àmpliament els rendiments dels motors de combustió interna. Cal destacar que, com totes les piles d'hidrogen, és una tecnologia neta i no allibera CO_2. Però com qualsevol sistema també presenta desavantatges, i un d'ells és el cost. Això és degut al platí, que utilitza com a catalitzador. Tot i això, des de que sorgiren aquest tipus de pila, no han parat d'evolucionar els sistemes per disminuir la quantitat que es necessita d'aquest metall preciós i creiem que el cost disminuirà a mesura que és generalitzi la utilització d'aquesta tecnologia.

La viabilitat de l'hidrogen

Actualment molts països en general i molta gent, a nivell particular s'interessen per trobar una solució al problema energètic i la qüestió més important que sorgeix resideix en si l'hidrogen és una solució viable per al problema que tenim amb els combustibles fòssils. Hi ha científics i especialistes sobre el tema que diuen que és una de les millors solucions energètiques, per al futur, juntament amb el sol i el vent. Pel contrari, n'hi ha d'altres que són més negatius i creuen que l'hidrogen econòmicament no és la millor solució al problema, ja que aquest requereix grans inversions.

A continuació citarem característiques favorables de l'hidrogen i més endavant els problemes que pot ocasionar o que poden impedir que es pugui fer global l'ús de l'hidrogen. Aquests trets els hem extret del treball i de la informació recopilada.

Propietats favorables de l'hidrogen

1.- No produeix emissions de CO_2 ni d'òxids de nitrogen ni d'òxids de sofre (causant de la boira fotoquímica).
2.- Alta densitat energètica E/m^2.
3.- Baixa energia d'activació.
4.- No tòxic.
5.- Alt límit inferior de inflamabilitat i detonació.
6.- Alta temperatura de combustió espontània.
7.- Molt segur en espais oberts.
8.- El rendiment és molt alt ja que se situa entre un 50% i un 90% que equival aproximadament al doble de l'eficiència del motor de combustió interna.
9.- La pila és molt silenciosa ja que no conte cap mecanisme mòbil, tot i que té un sistema de bomba per injectar el gas i un ventilador.
10.- L'hidrogen és inesgotable (ja que el trobem en l'aigua).
11.- Les piles de combustible són modulars això vol dir que podem adaptar cada pila a les nostres exigències.

Propietats desfavorables de l'hidrogen

1.- No és una font d'energia.
2.- Baixa densitat energètica E/V.
3.- Baixa temperatura de liqüefacció.
4.- Molt volàtil.
5.- Menys segur en espais tancats.
6.- Baixa energia d'activació.

Incerteses que presenta l'hidrogen

1.- Els mètodes de producció d'hidrogen són molt costosos i actualment encara no estan suficientment desenvolupats perquè l'hidrogen es produeixi en grans quantitats.
2.- L'emmagatzemament suposa un altre repte a resoldre, ja que la baixa densitat d'aquest gas fa que s'escapi molt ràpidament i calen grans pressions i molta energia per liquar-lo.
3.- Un altre aspecte a superar és la seguretat entorn a l'hidrogen. Aquest és un gas molt inflamable i altament explosiu amb contacte amb l'oxigen que hi ha, per exemple, a l'atmosfera, per això s'han de desenvolupar mesures que reforcin la seguretat del gas.

Encara que hi hagi alguns reptes que s'han d'aconseguir solucionar; s'ha d'investigar i recolzar tots aquest projectes que estan actualment en funcionament ja que poden fer que l'hidrogen sigui la solució energètica del futur per disminuir l'efecte hivernacle.

6. CONCLUSIÓ DEL TREBALL

Conclusió personal

A començaments d'estiu el nostre objectiu final, a partir de les dades obtingudes amb l'estudi de la pila, era la construcció d'un cotxe que funcionés fent servir una pila de combustible. Davant la complexitat que plantejava aquest muntatge i la falta de temps vàrem decidir construir una maqueta didàctica sobre el funcionament de la pila d'hidrogen. Un altre factor que va influir en el canvi d'orientació del nostre treball va ser el fet que el professor Jaume Pont Serra marxés de l'Institut Lluís de Peguera a treballar al Camp d'Aprenentatge del Bages, situat a la Casa de la Culla de Manresa. Va ser llavors quan ens vàrem assabentar que el camp d'aprenentatge volia tenir una maqueta sobre el funcionament d'una pila d'hidrogen per tal d'ensenyar-la als alumnes que realitzessin experiències sobre l'hidrogen. A finals d'estiu vàrem començar a realitzar petites experiències amb la pila d'hidrogen sense tenir un guió establert. Aquestes experiències les vàrem realitzar amb una pila d'hidrogen, proporcionada per l'Institut Lluís de Peguera, i un electrolitzador cedit per l' Institut de Castellar del Vallès, concretament pel professor Miquel Calvet i Solé, amb el qual contactàrem a traves d'en Jaume Pont. Durant aquelles experiències vàrem poder apreciar que l'electrolitzador no funcionava correctament, ja que produïa hidrogen molt lentament.

Definitivament ens vàrem adonar dels problemes de l'electrolitzador quan vam fer funcionar el kit proporcionat pel Camp d'Aprenentatge del Bages; llavors ens adonarem que totes les experiències fetes durant l'estiu van ser en va. Aquestes experiències van tenir una part positiva, ja que ens vàrem familiaritzar amb el funcionament de totes les parts del kit. Les experiències posteriors, les vam realitzar íntegrament amb el kit subministrat per la Casa de la Culla, encara que vam comprar una cel·la fotovoltaica que aportava més intensitat per si el procés de producció seguia sent lent.

Les experiències realitzades durant algunes tardes de dimecres i divendres ens van agradar molt. Vàrem poder comprovar com és l'experimentació en un laboratori. Encara que el desplaçament fins a la Casa de la Culla ens suposava una despesa de temps, després de realitzar aquestes experiències trobem que han valgut la pena tant per al treball com per la nostra formació acadèmica. També, a causa de la falta de temps, no hem pogut aprofundir més en la utilització de la pila, cosa que ens hauria agradat. Pensem que el treball de recerca és una bona idea, però recomanaríem dedicar més hores lectives durant la setmana i no posar-lo al segon de batxillerat.

Per a nosaltres, el treball en general, ens ha ampliat els nostres coneixements sobre l'hidrogen i les piles de combustible, concretament la pila d'hidrogen (PEM). Hem trobat una gran quantitat d'informació que ens ha estat difícil de resumir i d'encabir en el treball. Finalment, hem inclòs el plànol detallat amb els elements de la maqueta didàctica que voldríem que es construís en el futur per ensenyar la utilització de l'hidrogen.

Com hem dit a la introducció, aquest treball vol analitzar la situació actual dels sistemes d'aprofitament d'energia que es basen en l'hidrogen. Mai no hem tingut la intenció de millorar aquests sistemes ja que creiem que són molt complexos i no tenim

els coneixements adequats. La nostra intenció ha estat aclarir els nostres dubtes, satisfer la nostra curiositat sobre aquest tema i realitzar un treball que permetés la divulgació d'aquest nou vector energètic que es perfila com una alternativa als hidrocarburs. Creiem que aquests objectius s'han complert. Esperem que en un futur puguem veure alguns dels sistemes que hem estudiat en la vida quotidiana.

Assoliment dels objectius

Els quatre primers objectius que ens vàrem plantejar al començament del treball creiem que s'han assolit íntegrament, com reflecteix el treball, encara que ens hauria agradat seguir recopilant més informació, ja que ens han interessat molt tots els aspectes del treball i hem agut de desplaçar part de la informació a l'annex. Cal afegir que també hem complert el cinquè objectiu que consistia en dissenyar una maqueta didàctica. Referent als objectius que derivaven del funcionament i del disseny de la maqueta hem de dir el següent:

Estem satisfets perquè vàrem arribar a fer funcionar la cel·la correctament i n'hem comprés el seu funcionament. Vàrem realitzar un bon estudi, com es pot veure en la part d'experimentació amb la pila d'hidrogen, d'una cel·la de combustible. Aquest estudi ens va servir per obtenir els rendiment de tots els elements del kit i varem poder observar el funcionament d'una pila, que només havíem llegit als llibres. A partir d'aquestes experiències varem poder obtenir unes conclusions que ens van aclarir molts aspectes del funcionament sobre rendiments que havíem observat a les experiències.

Utilitzant les dades obtingudes, hem fet funcionar la pila amb la màxima potència i rendiment, encara que hem observat que el voltatge i la intensitat proporcionada per la pila és molt baix. Pensem que potser caldria connectar-ne dues en sèrie per a utilitzar l'energia aportada en alguna aplicació. Per últim cal dir que hem deixat dissenyada la maqueta per tal que sigui construïda, per nosaltres mateixos o per una altra persona, en el futur.

Hipòtesis:

Creiem que els apartats referents a la valoració i a la viabilitat de l'hidrogen aclareixen les hipòtesis que ens varem plantejar a l'inici del treball. Resumint podríem dir que, com ens pensàvem, l'hidrogen pot ser una solució per a substituir dels hidrocarburs. Aquest element, a més, si es produeix d'una manera neta, és completament net. Encara que no és l'única alternativa, i cal veure els seus avantatges i inconvenients, que es poden veure resumits en l'apartat anterior. El rendiment teòric i l'obtingut a partir de la cel·la que hem treballat és molt alt, més del que ens pensàvem; per això creiem que aquesta tecnologia seria molt apta per a l'ús en cotxes, cosa que disminuiria radicalment les emissions de CO_2.

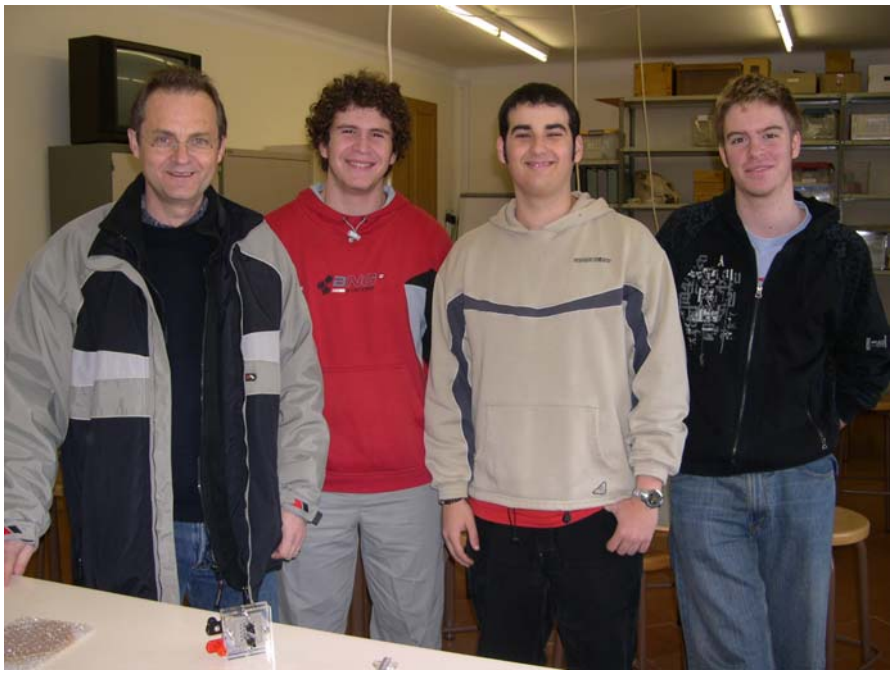
Referent a la segona i cinquena hipòtesis, val a dir que, com es pot observar a l'apartat d'investigació d'aquest treball situat a l'annex E, en pocs anys podrem veure un augment de les aplicacions que utilitzen piles d'hidrogen, principalment els cotxes o en generadors per a hospitals, restaurants... Si es compleixen les previsions que vaticinen alguns llibres, com l'esmentat a la bibliografia escrit per Jeremy Rifkin, la creació d'una xarxa mundial canviarà radicalment el món democratitzant l'energia.

7. Agraïments

Des de començaments d'estiu fins al dia d'entrega d'aquest treball hem d'agrair a moltes persones i centres el seu ajut i col·laboració en l'elaboració d'aquest treball de recerca. Tant en els aspectes teòrics, com en les experiències realitzades, la forma d'expressió a l'hora de redactar i en altres fets totes elles ens han ajudat d'una o altre manera.

Donem les gràcies a :

- El professor de física Jaume Pont i Serra per ajudar-nos a realitzar i entendre totes les experiències fetes i per cedir-nos un kit amb pila d'hidrogen gràcies a la seva actual col·laboració amb el camp d'aprenentatge del Bages.
- Al camp d'aprenentatge del Bages per poder, gràcies al Jaume Pont i Serra, realitzar les experiències en una de les aules de que disposa el camp i deixar-nos el kit amb la pila d'hidrogen.
- A l'institut Lluís de Peguera per deixar-nos una altre pila.
- Al nostre tutor del treball de recerca Ramon Tarruella i Boixadera, per tots els consells donats tan teòrics com pràctics, en la realització i perfeccionament del treball.
- A Anelco S. L., per donar-nos consell i assessorar-nos en la compra de material necessari per la realització de les experiències.
- Al Sr. Joan Tuneu familiar d'un dels autors d'aquest treball, el qual ens va ajudar amb l'ortografia i la gramàtica del treball.
- A les nostres famílies per traslladar-nos tant al camp d'aprenentatge del Bages com a casa d'un de nosaltres per reunir-nos per fer el treball i també revisar-nos algunes parts.



Grup que ha realitzat les experiències:
Jaume Pont, Ignasi Perramon, David Fernández, Mario Heredero

8. LISTA DE REFERÈNCIES

Llibres

- CREUS SOLÉ, ANTONIO. Energías Renovables. Ediciones CEYSA, 2004.
- MASJUAN, M.D. PELEGRÍN, J. 2 Química. Casals. 2003
- PIMENTEL, GEORGE C. SPRATLEY , RICHARD D. Química razonada. Editorial Reverté.1978
- RIFKIN, JEREMY. Paidós. 2002
- VARIS. Enciclopedia Salvat català. Salvat,1985.
- VARIS. Diccionarid de l'enciclopedia catalana. Enciclopedia catalana, 1994
- ZEMANSKY, M.W. Heat and Thermodynamics. McGraw-Hill, 1968
- SCHROEDER, DANIEL V.Thermal Physics. Addison Wesley Longman, 2000

Webs:

- Pàgina web d'una empresa que treballa i fabrica pila de combustible
  http://www.airema.com

- Pàgina de debat i informació sobre els cites i els tipus de piles de combustible
  http://www.pilasde.com

  Pàgina de la Asociación Española del Hidrógeno
  http://www.aeh2.org

- Pàgina on ens posarem amb contacte i intercanviar informació sobre el kit que disposàvem
  http://www.hforo.org

- Web de la qual vam treure imatges i informació sobre les característiques de l'hidrogen com element
  http://www.webelements.com

- Pàgina web d'informació i divulgació de les diferents activitats de les empreses que treballen amb les piles d'hidrogen i de combustible a tot el món
- http://www.worldwide.fuelcells.org

- Pàgina web on es pot trobar informació e imatges sobre cotxes i piles d'hidrogen
  http://www.h2car.biz

- Pàgina de l'Associació Catalana de l'Hidrogen
  http://www.ach2.net

- Pàgina de l'Associació Espanyola de Piles de Combustible
  http://www.appice.es

- Pàgina web didàctica on informa sobre els autobusos que funcionen amb piles d'hidrogen per la ciutat de Barcelona.
  http://www.xtec.es/aulatec/autohidrogen.html

- Aquesta pàgina web explica els diferents sistemes de transport i emmagatzemament com la seguretat de l'hidrogen.
  http://www.energiasostenible.net/laboratorio_hidrógeno.htm

- Pàgina web de la revista *Energètica* que tracta sobre les energies renovables, on es pot veure diferents arxius pdf amb explicacions de funcionament de projectes de diferents empreses.
  http://www.energetica21.com/esp/articulos/index.html

- Pàgina que informa sobre la nanotecnologia i l'emmagatzemament de l'hidrogen en nanotubs o nanoestructures.
  http://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnologia/nanotecnologia.htm

- En aquesta pàgina web es pot trobar projectes actuals sobre l'hidrogen i informació de com els països estan portant econòmica aquest la inversió en recerca.
  http://www.h2trade.com/

- Pàgina web de la plataforma europea de recerca de la tecnologia de l'hidrogen i les piles de combustible on informa sobre l'emmagatzemament de l'hidrogen i el transport entre d'altres. D'aquest web em obtingut algunes imatges sobre el transport i l'emmagatzemament de l'hidrogen que estan adherides al treball.
  http://www.infotools.hfpeurope.org/

- Pàgina web d'una revista de cotxes on hem tret imatges e informació sobre els prototips de cotxes que funcionen amb pila d'hidrogen.
  http://www.autoglobal.com

- Pàgina web on t'informa sobre com es tractat l'hidrogen pel que fa a seguretat en les empreses i recintes on es manipula, a causa del seu caràcter inflamable.
  http://www.hysafe.net

- Pàgina web de un grup fundat per la Comissió Europea que treballen amb piles de combustibles aplicades a l'automoció.
  http://www.fuero.org

- Pàgina web que informa sobre els avenços de la tecnologia de l'hidrogen fets per un grup d'empreses nord americanes.
  http://www.storhy.net

- Pàgina web on es pot veure el projecte de posada en marxa d'autobusos que funcionen amb pila d'hidrogen.
  http://www.fuell-cell-bus-club.com

- En aquesta pàgina es pot veure els processos que segueix la pila d'hidrogen per obtenir energia elèctrica.
  http://www.hi2h2.com

- Aquets pàgina web mostra els diferents projectes que es fan a Europa relacionats amb l'hidrogen.
  http://www.hynet.info

- Pàgina web d'un dels projectes que hi participa la Unió Europea sobre el perfeccionament de les piles d'hidrogen, amés informa sobre els avenços de les diferents empreses dels grups que treballen amb piles i hidrogen.
  http://www.eihp.org

9. Annexos

A. L'OBTENCIÓ DE L'HIDROGEN

1. Obtenció per fonts d'energia no renovables

1.1 Reformador del gas natural amb vapor

És la conversió catalítica endotèrmica d'hidrocarburs lleugers (metà a gasolina) amb vapor d'aigua. La reacció química industrial es realitza a temperatures de 850ºC i pressions de l'ordre de 2,5 MPa (25bar).

La conversió catalítica exotèrmica del CO produeix hidrogen pur:

$CO + H_2O = CO_2 + H_2$

Una membrana de separació elimina el CO_2, i el gas resultant d'aquesta separació té aproximadament un 60% de parts combustibles (H_2, CH_4, CO).

La capacitat de fabricació d'una planta típica és de 100.00 m^3H_2/hora, i el cost de fabricació de l'hidrogen amb aquest mètode oscil·la al voltant de 0,1 €/Nm^3.

1.2 Oxidació parcial dels hidrocarburs

És la conversió exotèrmica d'hidrocarburs pesats (fuel-oil residual del tractament del cru de petroli) utilitzant oxigen i vapor.

La capacitat de fabricació d'una planta típica és de 100.00 Nm^3 H_2/hora, i el cost de fabricació de l'hidrogen amb aquest mètode oscil·la al voltant de 0,125 €/Nm^3.

1.3 Oxidació parcial del carbó

El procés és idèntic al d'oxidació parcial d'hidrocarburs pesats, amb la diferència que el carbó es tritura fins a obtenir pols fina i es barreja amb aigua.

El cost de fabricació de l'hidrogen amb aquest mètode és d'uns 0,15 €/Nm^3.

1.4 Separació del carbó i l'hidrogen d'hidrocarburs

Es realitza mitjançant un procés d'arc de plasma a temperatures de 1.600ºC obtenint carboni pur i hidrogen sense produir emissions significatives. El procés està en fase de desenvolupament en una planta pilot.

1.5 Processos reformadors de petita mida i d'oxidació parcial

S'han estudiat per ser utilitzats en mòduls de cel·les de combustibles de potències de 10 a 250 Kw en aplicacions mòbils i petits sistemes fixes.

Es tracta d'un mercat en desenvolupament, en el qual la indústria de l'automòbil està fent grans esforços per substituir els motors d'explosió de gasolina o dièsel per motors elèctrics accionats per piles de combustibles d'hidrogen.

2. Obtenció per fonts d'energia renovables

2.1 Biomassa

La biomassa és la massa total de la matèria viva existent en una comunitat o en un ecosistema. La biomassa constitueix una font d'hidrogen quan és sotmesa als processos següents:

2.1.1 La gasificació i la pirròlisi

La gasificació i la pirròlisi de la biomassa, en fase d'investigació i desenvolupament, produeix en la primera etapa de la reacció coque, metanol i gasos primaris. A la segona etapa, reacciona amb l'aire (oxigen) i vapor donant una barreja de 20% de H_2, 20% de CO_2, 10% de CO, i un 5% de CH_4 I 45% DE N_2. Aquesta barreja de gasos es transforma en un gas ric en H_2 mitjançant un procés de gasificació (sòlid) o de reforma (gas). El gas de biomassa pot refinar-se per extreure l'hidrogen i ser utilitzat en piles de combustible.

2.1.2 La fermentació

En el procés de fermentació de la biomassa s'obté metà que pot utilitzar-se en piles de combustible de carbonat d'alta temperatura (Molten Carbonate Fuell Cell – MCFC). Aquest procés, malgrat que es troba ja en la fase comercial, encara es troba en procés d'investigació i perfeccionament per al seu ús en piles de combustible.

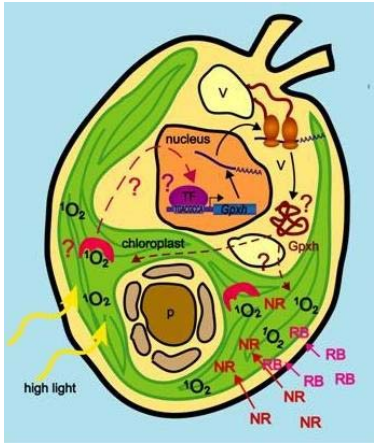
2.2 La producció biològica

En la producció biològica d'hidrogen, aquest s'allibera o apareix com un producte intermig a la fotosíntesi o a la fermentació. Des del segle passat, es conegut que les bactèries i les algues poden produir hidrogen sota l'efecte de la llum. Durant la crisi dels combustibles fòssil de 1970, s'inicià la investigació i la producció biològica d'hidrogen.

2.2.1 La Chlamydomonas Reinhardtii

Una alga prometedora és la Chlamydomonas Reinhardtii que és un organisme unicel·lular amb el cloroplast en forma de copa que creix en aigua dolça i pot cultivar-se fàcilment al laboratori.

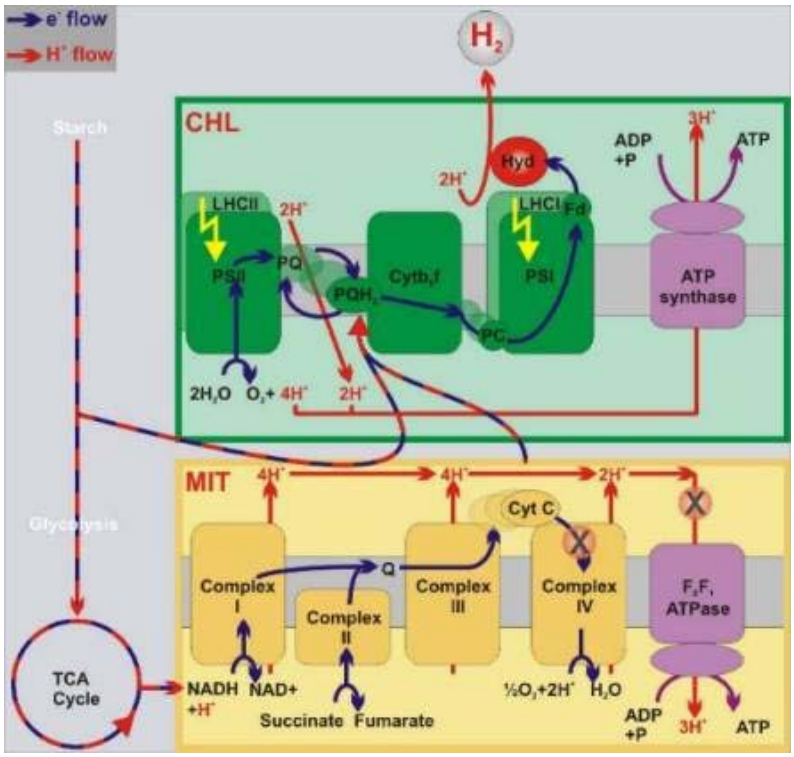
En els primers experiments va ser descobert que una deficiència de llum conduïa la microalga a treballar en condicions anaeròbiques i que l'hidrogenasa (enzim que actua com a catalitzador) actuava per produir H_2, però la quantitat era tan petita que no tènia aplicació comercial.



(Font:Energías Renovables))

En canvi, una deficiència del sofre provoca la parada del fenomen de la fotosíntesi. D'aquesta manera, en experiments realitzats en el laboratori, es permet que les algues creixin duran un cert temps per emmagatzemar energia i després e les introdueix en un medi sense sofre i quan han consumit tot l'oxigen (22hores), es troben en condicions anaeròbiques amb la qual cosa l'hidrogen comença a ser produït durant 4 dies, moment en què l'alga ha d'emmagatzemar una nova quantitat d'energia.

La producció d'H_2 s'accelera davant la llum intensa i es para en l'obscuritat, per tant és necessari exposar a la llum tota la superfície de la suspensió d'algues, quan es troben dintre del bioreactor, perquè la producció de H_2 es mantingui al màxim rendiment.



Sistema de producció de l'hidrogen
(Font: Energías renovables)

En el fenomen de la fotosíntesi existeixen dos fotosistemes separats però complementaris, el PSI de fotoreducció i el PSII de fotooxidació que s'activen a longituds d'onda iguals o majors de 680 nanómetres el primer i a longituds d'ona menors de 680 nanómetres el segon. A la primera etapa de fotoreducció del PSI per fotoexcitació de les molècules de clorofil·la es forma un poder reductor útil (com NADPH) i es crea energia (com ATP). A la reacció obscura l'ATP i el NADPH generats s'utilitzen per assimilar enzimàticament el CO_2 en forma de carbohidrats (sucre). Aquestes reaccions fotoquímiques produeixen la fotòlisi de l'aigua a oxigen i creen espècies altament reductores, les ferrodoxines.

En condicions determinades, en les quals s'ha d'evitar la inhibició del procés per part de l'oxigen, les molècules de ferrodoxina interaccionen amb una hidrogenasa, que és un enzim que actua com un catalitzador en la producció d'hidrogen, a partir de dos protons (H^+). Globalment, a partir de dues molècules d'aigua i d'energia solar, s'obtenen dues molècules d'hidrogen i una molècula d'oxigen.

2.2.2 Les cianobacteries

Un altre mecanisme de producció d'H_2 és la cianobactèria que utilitza nitrogenasa que fixa el nitrogen. Aquest procés té un menor rendiment que el de l'hidrogenasa però té una menor sensibilitat respecta l'oxigen. El sistema d'algues i bactèries sembla prometedor i les investigacions realitzades indiquen que el cost de la producció d'hidrogen amb aquest sistema arribarà els 0,125€/Kwh. Al futur, la microalga Chlamydomonas promet ser un bon productor d'H_2. Encara que, el problema fonamental que presenta és la intolerància a l'O_2, que és propi de la hidrogenasa. Aquest problema ha de ser resolt per incrementar el rendiment de la producció de H_2, del qual dependria no només els avanços que s'aconsegueixin en la investigació (microorganismos génetic, biorreactor,...) sinó també de consideracions econòmiques del desenvolupament d'altres sistemes de producció d'hidrogen.

2.3 Obtenció mitjançant l'energia eòlica

Com a exemple d'explotació per a petites granges, una turbina eòlica de 30 kW precisa d'un electrolitzador de 23,1 kWh, una pila de combustible de 17,5 kW, un banc de bateries de reserva de 350 KWh i un dipòsit per emmagatzemar hidrogen amb una capacitat per emmagatzemar 3.200m^3 de H_2.

2.4 Obtenció mitjançant l'energia solar

Un sistema típic consta de 2 pannells de 16 cel·les fotovoltaiques que subministren en un dia de sol uns 75 A i 14V, cosa que permet carregar les bateries de la casa. Un cop estan carregades, alimenten els electrolitzadors per produir hidrogen. Naturalment es precisa d'una font d'energia auxiliar per alimentar els electrolitzadors, en el cas que les bateries no estiguin totalment carregades. El cost aproximat de la instal·lació.

2.5 Cel·la solar fotoelectroquímica (PEC)

Un altre mitja d'obtenció de l'hidrogen, és la separació de l'aigua en els seus components H_2 i O_2 mitjançant una cel·la solar fotoelectroquímica (PEC – photoelectrochemical) que pot considerar-se com una placa fotovoltaica i un electrolitzador combinats en una sola unitat. El procés de reducció en forma d'H_2 s'aconsegueix amb un baix potencial en els elèctrodes. En l'any 2003, el rendiment en la conversió directa d'energia solar a H_2 era del 10%, amb una vida útil de 20 hores i amb un cost de 13 €/kg de material. L'objectiu en el futur immediat es aconseguir un rendiment del 12,4%, una vida útil de 10 anys i un cos de 3 €/kg.

Cel·la (PEC)
(Font: www.eere.energy.gov)

S'estan realitzant investigacions a nivell de nanoestructura per millorar les tècniques de pel·lícula prima, provar nous materials en els fotoanodes, per provar nous materials semiconductors i noves tècniques de control energètic de la interfase de l'electròlit semiconductor, arribar a entendre els fenòmens a nivell d'interacció superficial i identificar els paràmetres ambientals que afecten en semiconductor. Al laboratori s'estan desenvolupant electrolitzadors de vapor que utilitzen un electròlit ceràmic conductor d'ions i s'està investigant un procés per obtenir hidrogen, descomponent l'aigua a temperatura de 2.000º C mitjançant energia solar.

2.6 Taules

Cost de l'hidrogen segons nº d'automòbils fabricats

Nº de vehicles dotats de piles de combustible de H_2	**10**	**100**	**1.000**	**>10.000**
Estacions fabricants de combustible amb reformador de metà amb vapor, amb el H_2 comprimit a (34MPa) en tancs.	25 €/kW	4 €/kW	2,1 €/kW	1,9 €/kW
Lliurament de H_2 líquid per camió	40 €/kW	6,5 €/kW	2,8 €/kW	2,6 €/kW
Electrolitzador	5 €/kW	3 €/kW	2,8 €/kW	2,8 €/kW

Planta de producció de H2 (electròlisi amb energia eòlica)

Sistema en granja Electròlisi amb energia eòlica	**Cost actual instal·lació**	**Vida útil, anys**	**Cost actual energia €/kWh**	**Cost instal·lació dintre de 10 anys**	**Vida útil, anys**	**% cost**	**Cost futur energia €/kWh**
Turbina eòlica	1.400 €/kW	20		900 €/kW	20	12	
Electrolitzador	1.900 €/kW	10		700 €/kW	10	15	
Pila combustible	2.500 €/kW	5		>1.000 €/kW	10	16	
Bateries	200 €/kW	10		125 €/kW	10	20	
Compressor	6.600 €/kW	5		6.600 €/kW	5	2	
Tancs d'emmagatzemat	40 €/kW	20		30 €/kW	20	21	

Condicionador potència	500+900/P €/kW	19		440+720/P€ /kW	15	14	
Planta completa			**0,69**				**0,39**

Emissions de CO2 en l'obtenció de l'hidrogen.

Fabricació de H_2	**Emissions (Kg CO_2 / Kg H_2**
Electròlisis amb fonts d'energia renovables	0
Electròlisi amb Central de carbó (rendiment del 40%)	37
Electròlisi amb Central de gas natural (rendiment 55%)	15
Reformador de vapor de gas natural	5,5, - 7
Gasificació del carbó	15 – 16
Gasificació de la biomassa	0

Costos de fabricació de l'hidrogen

La taula següent indica el cost del H_2 a l'any 2003 obtingut a partir de varies fonts fòssils i renovables, entenent que avui en dia es produeix generalment a partir de fonts fòssil. Partint de la fabricació de 100.00 Nm^3 de H_2. els costos de fabricació son:

Equip	**Cost 2003 (€/kW)**	**Cost 2020 (€/kW)**	**Cost 2003 (cents €/kW)**	**Cost 2020 (cents €/kW)**
Reformador de gas natural amb vapor			3	
Oxidació parcial del fuel-oil			4	
Gasificació del carbó			5 a 7	
Electròlisis (centrals hidroelèctriques)			3 a 6	
Energia eòlica	1.400	900	9 a 16	5 a 6
Energia solar tèrmica			18 a 25	8 a 12
Energia solar fotovoltaica	1000 €/kW_p		30	14
Energia geotèrmica	1.500 €/kW_p		0,012 €/kWh	
Gasificació de biomassa	71.091 €/Nm.t. H_2/dia		0,83 – 1,26 €/kg de H_2	5
Electrolitzador	1.900	700	0,87 €/kg de H_2	
Compressió, emmagatzemat i servei de H_2	513 €/(kg de H_2/dia)		0,27 €/kg de H_2	
Pila de H_2	2.500	1.000		

2.7 Avantatges de la producció de H_2 amb energies renovables:

Quan s'utilitzen les energies renovables per a la producció de H_2, en lloc de combustibles fòssils, s'estalvien tones de CO_2 a l'atmosfera. Les quantitats varien entre 0,27 Kg a 1,05 Kg de CO_2/Kwh. Al mateix temps deixen d'enviar-se a l'atmosfera altres gasos perjudicials com NO_x, SO_x i partícules. Per exemple una placa fotovoltaica de 1 kWh exposada diàriament al sol durant 5,5 hores, estalvia anualment 1.330 kg de CO_2. S'ha de ressaltar que una placa de silici cristal·lí que genera una energia de 600 Kwh/m^2, estalvia una mitjana de 0,662 Kg de CO_2/Kwh i emet al procés de fabricació 400 Kg de CO_2. Suposant un rendiment del 10% i una radiació solar mitjana de 1 Kw/m^2 són necessaris 10 m^2 de superfície col·lectora per generar 1 kWh. La fabricació de 10 m^2 de pannell produeix 4.000 Kg de CO_2, cosa compensada evitant emissions de CO_2 durant 3 anys a una mitjana de 1.330 kg/any. Al futur s'estima que els procediments de fabricació milloraran aquests factors.

B. ANNEX: L'EMMAGATZEMAMENT

1. L'Efecte Joule – Thomson (Kelvin)

L'efecte Joule és el refredament que s'esdevé en un gas real quan s'expandeix adiabàticament (sense intercanvi de calor amb els cossos del voltant) sense fer cap treball extern.

El nom prové de James Prescott Joule i William Thomson, primer Baró Kelvin, que va establir l'efecte al 1852 seguint la feina realitzada per Joule en la llei de Joule, on s'indica que un gas s'expandeix amb una energia interna constant.

La relació entre la temperatura, la pressió i el volum d'un gas és descrita amb les lleis del gasos (P.V = n.R.T). Quan el volum augmenta, les lleis dels gasos no determinen què ha de passar amb la pressió i la temperatura. En general, quan un gas s'expandeix adiabàticament, la temperatura pot baixar o pujar, depenent de la temperatura i de la pressió inicial.

Per a una pressió fixa, cada gas té una temperatura d'inversió determinada. Quan es realitza aquest procés amb una temperatura inicial que està per damunt de la temperatura d'inversió, l'expansió del gas provoca un augment de temperatura. En canvi, si es realitza el procés amb una temperatura inicial que està per sota de la temperatura d'inversió, l'expansió causa un refredament. En la majoria de gasos, a pressió atmosfèrica, la temperatura inicial és més baixa que la temperatura d'inversió del gas, per això poden ser refredats per expansió degut al treball intern necessari per unir les partícules, forces intermoleculars.

El canvi de temperatura (ΔT) respecte el canvi de pressió(Δp) al procés Joule-Thomson es pot calcular pel coeficient Joule-Thomson (Kelvin):

$$\mu = \frac{\Delta T}{\Delta p}$$

1.1 L'effecte Joule Thomson negatiu (Heli i Hidrogen)

Una notable excepció de la regla, que diu que la temperatura baixa amb l'expansió, és l'heli i l'hidrogen, quan aquests són sotmesos a la inversió de temperatura Joule-Thomson a una atmosfera de pressió, s'escalfen. Això és degut que, a pressió atmosfèrica, la temperatura inicial d'aquests gasos és superior a les seves respectives temperatures d'inversió, per tant el procés provoca un escalfament. Durant les col·lisions, l'energia cinètica és temporalment convertida en energia potencial. Això significa una baixada de la densitat que provoca una disminució de les col·lisions per unitat de temps, i com a conseqüència una baixada de l'energia potencial, que gràcies a la conservació de l'energia és convertida en energia cinètica i d'aquesta forma provoca una pujada de la temperatura. En el cas de l'hidrogen i l'heli, la conversió d'energia potencial en energia cinètica és més gran que l'increment d'energia potencial degut a forces electromagnètiques.

L'única manera d'obtenir un refredament mitjançant el procés Joule-Thomson en hidrogen o heli és realitzant un refredament previ, utilitzant nitrogen líquid perquè els gasos es trobin a temperatura molt baixa al començament del procés, permeten un refredament després de procés.

2. Taules

Taula (alimentació de H_2 a les piles de combustible)

Font: "Fuels for Portable Fuel Cells", US Fuel Cell Council, July 2000

Alimentació H_2	**Wh/kg**	**Wh/l**	**Cost €/Kwh**	**Observacions**
Comprimit	74-124	124-160	740-867 (inicial) 1300 (reomplir)	Infrastructura d'omplerta.
Híbrid (baixa temperatura)	69-118	146-305	3125-6770 (inicial)	Infrastructura d'omplerta.
Líquid				Indústria espacial
Hidrurs metàl·lics				
Nanotubs de carboni	-	-	-	Tecnologia immadura.
Metanol amb reformador	2491	1971	>0,06 (inicial) >0,06 (reomplir)	Infraestructura per omplir i distribució del metanol
Metanol directe	1938	1533	>0,08 (inicial) >0,08 (reomplir)	Infraestructura d'omplerta i distribució.

Hidrurs metàl·lics per emmagatzematge d'hidrogen

Font: Commissariat à l'énergie atomique – CEA 2002

	Hidrur de magnesi	**Hidrur de paladi**	**Hidrur de titani-ferro**	**Hidrur de magnesi-niquel**	**Hidrurd de zirconi-magnesi**	**Hidrur de lantani-niquel**
Capacitat d'absorció de massa (%)	7,6	0,72	1,86	3,6	1,77	1,5
Presió d'equilibri a 20ºC (bar)	10^{-6}	$8,2*10^{-3}$	4,1	10^{-5}	10^{-3}	1,8
Temperatura a 1 bar (ºC)	279	147	-8	255	167	15
Grau de sensibilitat a les impureses a l'hidrogen	Altament sensible a l'oxigen i a l'aigua	Sensible al CO	Altament sensible al oxigen, a l'aigua i al CO	Baixa sensibilitat relativa	Sensible al SO_2	Sensible, a l'oxigen, a l'aigua i al CO
Cinètica d'absorció/alliberació	Molt lenta	Ràpida	Ràpida	Mitjana	Molt ràpida	Molt ràpida

C. ANNEX: LA SEGURETAT

L'hidrogen és un gas de baixa densitat que, al barrejar-se amb l'aire, crema amb una flama que es propaga, ràpidament a uns 50m/s. Té un poder calorífic important. La flama no és visible i no dona pràcticament radiació. L'hidrogen ha d'estar comprimit en dipòsits a pressió per al seu emmagatzament i ús. Una explosió d'hidrogen allibera una gran energia, per això en el futur, els vehicles d'hidrogen hauran de disposar d'una bona ventilació. Des del punt de vista de la seguretat s'usen sensors per detectar fugues i vigilar la qualitat de l'hidrogen, per preveure així explosions i la degradació del catalitzador de la pila de combustible. L'hidrogen gas és incolor, les flames són invisibles a la llum del dia, i no tenen olor, per això és difícil de detectar. Un procediment similar a l'addicció al gas natural de substàncies amb olor per detectar-lo, és difícil de realitzar amb l'hidrogen, ja que moltes substàncies podrien degradar el catalitzador de la pila de combustible.

Des del punt de vista de fugues, l'hidrogen no és tòxic i es dispersa ràpidament al ser molt més lleuger que l'aire, el que és favorable. Encara que, té una baixa energia d'ignició (menor que la gasolina i el gas natural) i presenta una amplia varietat de concentracions explosives a l'aire, per tant pot inflamar-se amb facilitat. Una altre característica és que molts materials es tornen fràgils en contacte amb l'hidrogen.

Com a conseqüència, és necessari proporcionar una bona ventilació, i una detecció adequada de les fugues i de la presència de flama i seleccionar els materials més idonis. Comparant l'incendi d'una fuga de gasolina en un automòbil amb el corresponent a una fuga d'hidrogen, es pot veure que després de 100 segons, l'hidrogen ha cremat completament sense provocar danys a l'interior de l'automòbil, per contra la gasolina encara continua cremant i el destrueix totalment. Segons indica en un informe de maig del 1997 de la Ford Motor Company sobre la seguretat en la manipulació de vehicles propulsats per hidrogen, l'incendi del dirigible Hindenburg el 6 de maig de 1937 a Lakehurst (Nova York), va ser degut a d'una espurna estàtica provocada per un disseny defectuós del dirigible, que crema l'estructura (acetat o nitrat de cel·lulosa) el qual era extremadament inflamable, i d'aquí el foc va passar l'hidrogen. En altres paraules, el dirigible s'hagués cremat encara que hagués contingut heli.

1. Taules

Taula: Comparació entre les propietats de l'hidrogen, el gas natural i la gasolina

Propietats	**Hidrogen**	**Gas natural**	**Gasolina**
Poder calorífic inferior (KJ/g)	120	50	44,5
Límits de inflamabilitat en aire (% vol)	4,0 – 75	5,3 -15	1,0 – 7,6
Energia d'ignició en aire (MJ)	0,02	0,29	0,24
Temperatura d'ignició (ºC)	585	540	228-501
Temperatura de la flama	2.045	1.875	2.200
Límits de detonació en aire (%vol)	18 – 59	6,3 – 13,5	1,1 – 3,3
Energia d'explosió (g-TNT/m^3 gas)	2,02	7,03	44,22
Coeficient de difusió en l'aire (cm^2/s)	0,61	0,16	0,05
Emisivitat de la flama (%)	17 – 25	25 – 33	34 – 43
Velocitat propagació flama en l'aire (cm/s)	265	40	40
Velocitat de detonació (km/segon)[1]	1,48 – 2,15	1,39 – 1,64	1,4 – 1,7

Taula: Escala de seguretat de combustibles

Característiques	**Escala**		
	Gasolina	Gas natural	Hidrogen
Toxicitat combustible	3	2	1
Toxicitat de la combustió	3	2	1
Densitat	3	2	1
Coeficient de difusió	3	2	1
Calor específica	3	2	1
Límits d'ignició	1	2	3
Energia d'ignició	2	1	3
Temperatura d'ignició	3	2	1
Temperatura flama	3	1	2
Energia explosió	3	2	1
Emisivitat flama	3	2	1
Total	30	20	16
Factor seguretat	0,53	0,80	1,00
1, segur; 2, menys segur; 3, el menys segur			

Velocitat de detonació: és la velocitat (m/s) o (km/s) a la qual l'ona frontal de detonació avança a través d'una columna.

Factor de seguretat: Nombre obtingut a partir de la valoració de les diverses característiques, referents a la seguretat, d'un element o combustible.

Una de les pors que existeix en el mercat sobre la tecnologia del hidrogen és la gran capacitat d'inflamar-se i la facilitat que té per explotar, però una comparativa realitzada per una universitat americana demostra tot el contrari. A continuació es mostra la seqüència d'imatges en la que es pot observar la diferent evolució de l'explosió d'un cotxe d'hidrogen i un de benzina.

Cotxe d'hidrogen Cotxe de benzina

t= 0s

t= 3s

t= 1m

t= 1m 30s

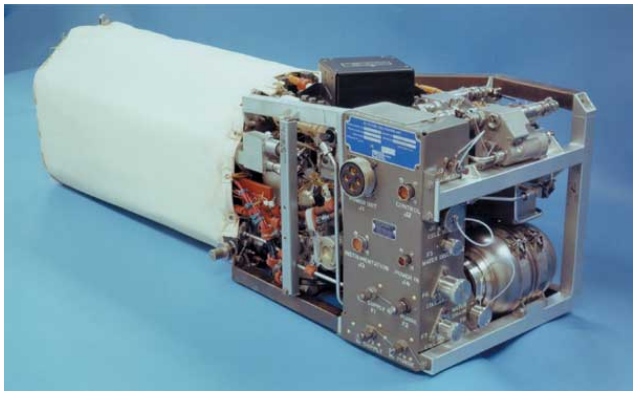
t= 2m 20s

Tal i com es veu a la seqüència anterior, el cotxe d'hidrogen no explota, en canvi el de benzina sí. Aquest fet demostra la fiablilitat del hidrogen pel que fa a la seguretat.

D. ANNEX: TIPUS DE PILES DE COMBUSTIBLE

1. Piles de combustible alcalines AFC (Alkaline Fuel Cell)

L'electròlit és hidròxid de potassi concentrat al 35-50% quan treballa a temperatures inferiors a 120ºC, i poden operar a 250ºC quan la concentració és del 85%. Com es tracta d'un electròlit líquid és necessari la utilització d'una matriu que el retingui. Els elèctrodes contenen alt contingut en metalls nobles, ànodes de platí/paladi i càtodes d'or/platí. Podent utilitzar un ampli ventall d'electrocatalitzadors, com níquel, plata i òxids metàl·lics. El rendiment de generació elèctric pot arribar al 40%.



Pila AFC
(Font: http://www.appice.es)

La tecnologia d'aquestes cel·les està molt desenvolupada, ja que s'han utilitzat en dispositius espacials.

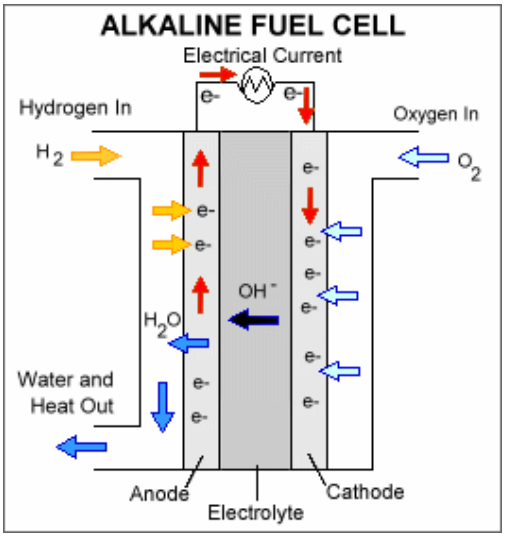
El combustible ha de ser hidrogen pur. Si existeixen restes de CO_2 (màxim 10 – 20 p.p.m.), aquest és absorbit pel KOH i es forma carbonat potàsic, el qual redueix enormement la eficiència de la pila de combustible. Aproximadament aporten 0,8 V i la densitat de corrent està al voltant dels 0,15 A/cm^2, que és deu vegades menor que les PEM.

Les reaccions de les piles:

Ànode: $2H_{2(gas)} + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$

Càtode: $O_{2(gas)} + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

Cel·la: $2H_{2\,(gas)} + O_{2(gas)} \rightarrow 2H_2O$



(Font: www.eere.energy.gov)

Història

El 1902 Reid descriu el funcionament de la primera pila de combustible alcalina, però no serà fins als anys trenta, quan Francis Thomas Bacon (1904-1992) arriba a desenvolupar-la suficientment per iniciar els primers projectes de demostració. Concretament la millora de F.T. Bacon consistia en incorporar elèctrodes amb difusió de gasos i operar a pressió per evitar que l'electròlit inundi els porus dels elèctrodes.

El gran avenç s'aconsegueix amb el projecte Apol·lo, posterior al Gemini (on es van usar piles de combustible polimèriques amb poc èxit). Pratt & Whitnei, companyia fabricant d'avions fundada al 1925, adquireix les patents de Bacon i aconsegueix el contracte de la NASA per a aquest projecte. Aquesta tecnologia també va ser usada als programes espacials soviètics (SOIUZ) i, més tard, per l'Agència Russa de l'Espai en el Programa BURAN.

2. Piles de combustible d'àcid fosfòric PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)

Utilitzen àcid fosfòric concentrat com electròlit, tenen una matriu de carbur de silici i treballen a una temperatura entre 150 i 250ºC, lleugerament superior a les alcalines i a les PEM. Els elèctrodes són de platí suportat sobre carbó, amb una alta sensibilitat al CO (màxim entre 1% i 2%). A part de la cel·la alcalina, aquest tipus de cel·les són les que tenen un major nivell de desenvolupament tecnològic, amb una àmplia utilització en aplicacions estacionàries en fase de demostració.

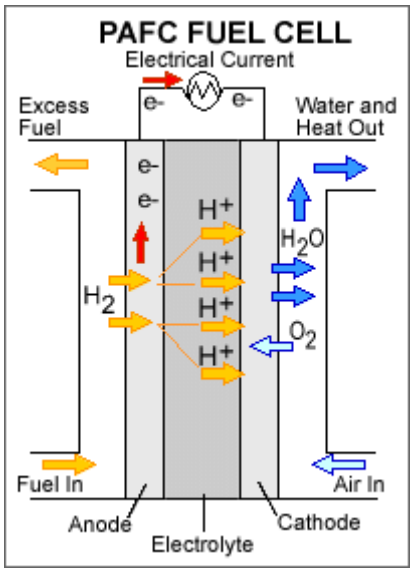
Pila PAFC
(Font: http://www.appice.es)

El rendiment és del 36% al 42%. Es poden aconseguir valors majors per presurització dels fluids de combustible i oxidant. La pila requereix més temps que la PEM per escalfar-se i aportar energia. La densitat de potencia està al voltant de 0,18 W/cm^2.

$$\text{Ànode:} H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$

$$\text{Càtode:} 1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$$

Aquesta tecnologia presenta una tolerància a contaminants generats en el procés de reformat d'hidrocarburs, molt superior a la resta de piles de combustible de baixa temperatura. Aquestes característiques fan que la implantació d'aquestes, a curt termini, sigui més fàcil.



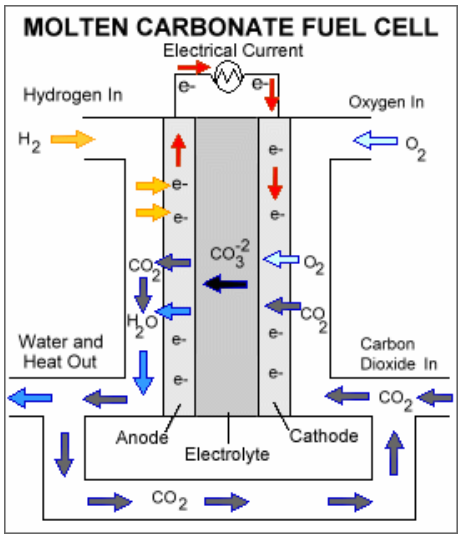
(Font: www.eere.energy.gov)

Història

La primera monocel·la de W. Grove el 1939 incorporava àcid sulfúric com a electròlit, però la corrosió que produïa va limitar el seu desenvolupament i va ser per això que va començar a estudiar-se la possibilitat dels electròlits sòlids o utilitzar dissolucions alcalines, menis corrosives. El 1961 G.V. Elmore i H.A. Tanner van publicar els primers resultats amb aquest tipus de piles.

3. Piles de combustible de carbonats fosos. (Molten Carbonate Fuell Cell o MCFC)

Utilitzen com electròlit una sal fosa de carbonats alcalins (Li, Na, K) retinguts en una matriu d'aluminat de liti. Operant a temperatures superiors a 650ºC, milloren les seves prestacions quan es treballa a alta pressió. Els materials utilitzats per als elèctrodes són el níquel dopat amb crom o alumini per a l'ànode, i òxid de níquel dopat amb liti per al càtode. Actualment s'estan desenvolupant altres materials més resistents a la corrosió. S'utilitzen en aplicacions estacionàries amb aprofitament de la calor residual generada. Actualment estan molt desenvolupades i s'espera una comercialització a curt termini.



(Font: www.eere.energy.gov)

Admeten altes concentracions de CO i CO_2 en els gasos d'alimentació, la qual cosa les fa idònies per a la utilització de tot tipus de combustibles, com el gas natural, biogas, bioetanol, etc. Els òxids de carboni es formen en el procés de reformat d'aquests combustibles de baixa temperatura. Un avantatge és el fet de poder alimentar directament un hidrocarbur sense la necessitat d'extreure l'hidrogen prèviament.

Ànode: $2H_{2(gas)} + (CO_3)^- \rightarrow H_2O_{(vapor)} + 2e^- + CO_{2(gas)}$

Càtode: $\frac{1}{2} O_{2(gas)} + CO_{2\ (gas)} + 2e^- \rightarrow CO_3^-$

Cel·la: $H_{2\ (gas)} + \frac{1}{2} O_{2\ (gas)} + CO_2 \rightarrow 2H_2O_{(vapor)} + CO_{2(gas)}$

La pila pot treballar amb hidrogen, monòxid de carboni, gas natural, propà, gasoil i carbó gasificat, arribant a potències de 10 Kw i 2 Mw. El seu rendiment pot arribar al 60% i fins al 85% si s'utilitza cogeneració (turbina gas) per aprofitar la calor excessiva generada.

Història

El 1900 Walter Nerst investiga la potencialitat de l'òxid de zirconi com electròlit sòlid, buscant una alternativa als electròlits àcids. Posteriorment, el desenvolupament d'aquesta tecnologia va venir impulsada per l'expectativa de poder fer servir directament carbó sòlid com a combustible.

Baur i Preis (1937) a Suïssa van provar la utilització dels carbonats alcalins com elements bàsics per al desenvolupament d'aquest sistema, tot i que amb poc èxit. A més, la conductivitat de l'electròlit no era suficient per treballar amb combustibles gasosos i es produïen reaccions no desitjades en els elèctrodes.

Més tard, el 1946, el científic rus O.K Davtian va desenvolupar una cel·la que funcionava a 700ºC amb un conductor sòlid iònic com a electròlit. Durant els anys quaranta, continua la investigació a Rússia, però no va ser fins a la dècada dels cinquanta que els danesos G.H.J. Broers i J.A.A. Ketelaar abandonen la línia dels electròlits òxids i optaren per les sals foses. Aquests l'any 1960 informaren de les proves realitzades sobre una pila, amb un electròlit compost d'una mescla de carbonats de liti, sodi i/o potasi, impregnats sobre un disc porós sintetitzat de magnesi, que havien fet funcionar durant sis mesos

En aquesta mateixa dècada, la organització industrial americana Gas Technology Institute (creada fa més de 60 anys) començà el seu estudi amb piles de combustible de carbonats fosos, demostrant la seva capacitat de generació d'energia elèctrica a alta temperatura. El màxim exponent en el desenvolupament d'aquesta tecnologia és l'empresa alemanya MTU, amb el seu soci americà, Fuell Cell Energi

4. Piles de combustibles d'òxids sòlids SOFC (Solid Oxide Fuell Cell)

Pila SOFC
(Font: www.appice.es)

L'electròlit utilitzat en aquestes cel·les és un òxid metàl·lic no porós que sigui bon conductor iònic, normalment òxid de zirconi estabilitzat amb òxid d'Itri. Aquestes cel·les treballen a temperatures d'entre 900-1000ºC. Temperatura a la qual té lloc la conducció iònica d'ions d'oxigen. Normalment, l'ànode és una mescla de ceràmica i metall, Ni-ZrO_2, i el càtode, una magnatita de lantani dopada amb estronci i seleni. Atesa la seva alta temperatura de treball, com passa a les MCFC, poden utilitzar la calor residual que generen en el procés de reformat del combustible. La possibilitat de treballar a major densitat de corrent i sense problemes de corrosió, davant les MCFC, les converteixen en una alternativa interessant i com una de les piles de combustible d'alta temperatura més prometedores.

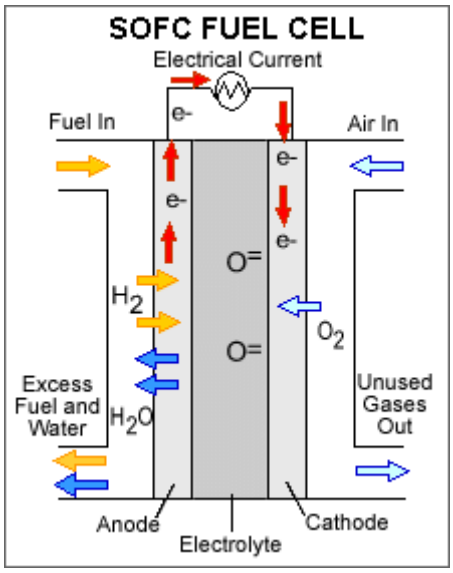
El repte actual està en disminuir la temperatura d'operació fins a aconseguir fer-la funcionar a una temperatura d'entre 600-800ºC en les noves piles IT-SOFC (Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell). La investigació sobre aquestes es concentra en disminuir el gruix de la capa de l'electròlit i la recerca de nous materials, basats en òxids lantànids o amb estructura perovskita, que presenten alta conductivitat iònica a baixa temperatura.

Ànode: $H_{2(gas)} + O^- \rightarrow H_2O_{(vapor)} + 2e^-$

$CO + O^- \rightarrow CO_2 + 2e^-$

Càtode: $O_{2(gas)} + 4e- \rightarrow 2O^-$

En petites piles, s'arriba a tensions de 0,6 V/cel·la i densitats properes als 0,25 A/cm^2. Tenen una vida útil de 30.000 hores i poden suportar un nombre bastant considerable de cicles d'escalfament/refredament. Amb els gasos d'entrada a condicions normals s'obtenen rendiments pròxims al 45% i si s'injecta el gas a pressió el rendiment arriba al 60%.



(Font: www.eere.energy.gov)

Història

Les piles de carbonats fosos i les d'òxids sòlids es van desenvolupar a finals dels anys seixanta. Durant aquesta dècada, es va descobrir que la conductivitat en determinades sals foses era molt superior que la dels òxids sòlids. Molts dels principals laboratoris van abandonar aquesta via a favor dels carbonats fosos. No obstant, Westinghouse aposta per la tecnologia SOFC i el 1962 va treure un model usant un electròlit d'òxids de zirconi i calci.

E. ANNEX: PROJECTES SOBRE LA RECERCA I DESENVOLUPAMENT DEL MÓN DE L'HIDROGEN

1. Introducció

Actualment tant en la unió europea com a la resta del món, hi ha empreses o agrupacions que inverteixen part dels seus beneficis en la recerca en noves tecnologies com ara l'hidrogen. Fa relativament poc, amb l'entrada al govern del partit socialista l'any passat, es va orientar part dels impostos en ajudes a empreses i per la formació d'un pla anomenat "Investigación + Desarollo + Inovación "(I+D+I), que la unió europea també va posar en funcionament. Tant per al desenvolupament com a combustible, com per a la recerca i innovació en el camp de l'automobilisme, l'hidrogen és una solució que es pren amb molt d'interès i visió de futur en tot el món. A continuació citem una llista d'empreses europees les quals en aquests moments tenen projectes en marxa relacionats amb l'hidrogen i el seu funcionament òptim en el futur.

1.1. Projectes de la Unió Europea

HYSAFE: Aquesta xarxa agrupa a algunes de les principals empreses industrials i centres d'investigació amb l'ànim de col·laborar amb les activitats d'investigació relatives a múltiples qüestions de seguretat de l'hidrogen que afecten als vehicles e infrastructures de l'hidrogen.

FUERO: És una agrupació de nous projectes que es dedica a fixar els requisits dels components i els sistemes per als vehicles de piles de combustible. Dins d'aquest grup existeixen projectes dedicats a desenvolupar processadors de combustible (ex. gasolina, metanol, etanol), així com components bàsics dels sistemes de piles de combustible.

STORHY: És un projecte dirigit principalment per fabricants d'automòbils i proveïdors d'hidrogen de Europa, tenen com a objectiu desenvolupar sistemes d'emmagatzemament de piles de combustibles alimentades per hidrogen o de motor de combustió interna resistents, segurs i eficaços; que siguin vàlids per al seu treball dins dels vehicles.

CUTE: Es tracta del major projecte de demostració a nivell mundial en què participa un parc d'autobusos alimentats per piles de combustibles. En nou ciutats europees (entre elles Barcelona i Madrid) circulen i donen servei regularment vint-i-set d'aquests autobusos des de l'any 2002, utilitzant sistemes innovadors de producció, emmagatzemament i subministrament d'hidrogen. Aquesta iniciativa va ser completada amb el projecte ECTOS a Islàndia.

MOREPOWER: L'objectiu d'aquest projecte es desenvolupar les piles de combustible de baix cost, portàtils directes de metanol o directes d'etanol. El problema principal es aconseguir un funcionament eficaç a temperatures molt baixes i amb costos reduïts. Aquests dipòsits podrien utilitzar-se en aplicacions microenergètiques (ex. telèfons mòbils i ordinadors portàtils) o en energia portàtil (ex. equips per jocs, eines motoritzades, ...).

(Font: www.eere.energy.gov)

HI2H2:Aquest projecte te previst utilitzar els últims materials i processos de producció per desenvolupar i provar un innovador electrolitzador d'alta temperatura per a la producció eficaç i poc consum d'hidrogen, mitjançant la utilització de tecnologies de conversió electroquímica d'òxid sòlid.

BIO-H2: El projecte està dedicat a estudiar la possibilitat de conversió de bioetanol amb la finalitat de produir l'hidrogen dins del vehicle.

HyNet: Aquesta xarxa temàtica agrupa diversos projectes interessants, que tenen com a finalitat elaborar una fulla de ruta europea de l'hidrogen que determini les estratègies de transició necessàries per passar dels sistemes energètics actuals basats en combustibles fòssils als futurs sistemes d'energies sostenibles, basats en electricitat i l'hidrogen. Aquesta iniciativa ha estat origen del projecte HYWAYS, encarregat de realitzar una exhaustiva anàlisi tècnica i socioeconòmica de les diverses possibilitats de producció de l'hidrogen.

EIHPII: El projecte europeu de l'hidrogen integrat és una iniciativa prenormativa d'investigació i desenvolupament tecnològic (I+D+I, anteriorment citat en la introducció) en què participen vint socis i que s'ocupa de l'harmonització mundial de la normativa de la Unió Europea relativa als vehicles alimentats per hidrogen líquid o gas comprimit, i a la infrastructura necessària per el seu abastiment.

De Nora S.p.A: De Nora S.p.A d'Itàlia treballa amb piles d'hidrogen tipus PEM per autobusos i aplicacions marines. Aquesta agrupació d'empreses està cooperant amb Renault i Peugeot/Citroen en projectes de cotxes amb piles de combustible. De Nora va subministrar el motor de pila de combustible demostrat al camió de Coval.

Siemens/KWU: Siemens/KWU es troba en proves d'una mini grua de pila. La pila d'hidrogen PEM de 10 kW utilitza tancs d'hidrurs base titani. Els tancs poden emmagatzemar 23cm^3 estàndards d'hidrogen gas suficient per vuit hores de operació.

1.2 Projectes a la resta del món

Gran part de les empreses nord americanes estan associades amb l'*U.S. Department of Energy*; ministeri nord americà de l'energia.

Ballard Power Systems: Ballard va introduir el Mark 902, la plataforma de piles de combustible més avançada en l'actualitat. Aquesta empresa juntament amb Daimler Chrysler i Ford Motor Company han firmat un acord en el qual Ballard proporcionarà les piles de combustible i rebrà una part dels beneficis de venda dels cotxes de DaimlerChrysler, Ford i Ecostar Electric Drive Systems, LLC., les quals utilitzen els seus serveis.

Energy Partners: Companyia de motors elèctrics de piles de combustibles que desenvolupa motors elèctrics i vehicles amb la tecnologia de l'hidrogen. Marques com General Motors, Suzuki Motors Corp. i Chevron Texaco Corp. utilitzen els seus productes per desenvolupar els models tant híbrids com amb piles d'hidrogen.

JLG Industries, Inc: Aquesta empresa ha desenvolupat un "col·lector de fruites tipus cherry" impulsat per piles de combustible i un elevador per tallar les branques dels arbres i reparar línies elèctriques.

H Power: H Power Corporation, empresa americana, ha construït un sistema de potència de piles de combustible per propulsar una cadira de rodes. Els 200 watts de la pila PEM utilitza l'hidrogen com a combustible emmagatzemat i es pot tornar a omplir en pocs minuts

Nevada Test site Development Copr: Treballen amb la compressió de l'hidrogen, la producció mitjançant el reforming, dispensadors per cotxes d'hidrogen i sobre la fabricació de piles PEMFC. Esta localitzada a Las Vegas des de novembre de 2002.

Stuart Energy Systems: Aquesta empresa nord americana amb seus a diferents parts del món, treballa amb piles d'hidrogen pel que fa a la producció de gas i a les formes de comprimir-lo; a part de cercar noves vies de recerca sobre la perfecció de les piles. Una de les seves seus principals és la que tenen a Montreal.

HFCIT: Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Programm és un programa que ha posat en marxa diverses empreses amb el Ministeri de l'Energia als Estats Units per tal d'englobar i especialitzar les diferents vies de treball pel que fa a fabricació i desenvolupament de les piles d'hidrogen.

Com hem pogut veure la majoria de projectes europeus i d'arreu del món estan relacionats amb l'hidrogen, es centren en la incorporació del gas als vehicles i al desenvolupament de noves tècniques per millorar els actuals processos. Moltes companyies i empreses ja tenen prototips fabricats, el que falta ara és millorar-los i acomodar-los perquè treballin al cent per cent sense problemes i que d'aquí a uns anys els utilitzem en la nostra societat.

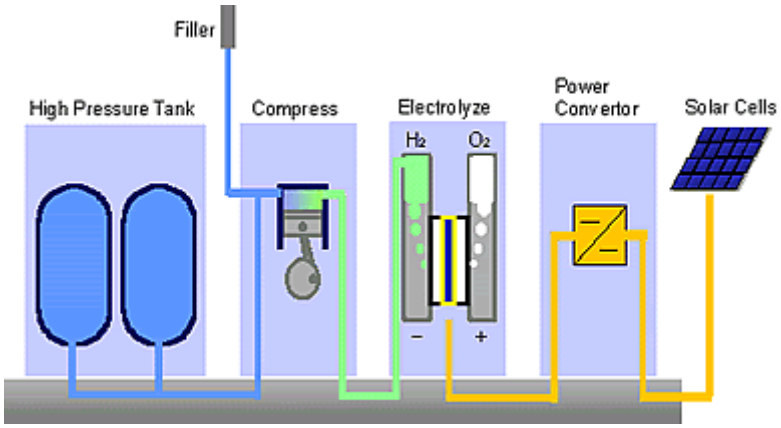
2. Projectes actual en l'àmbit de l'automoció

L'hidrogen juntament amb la seva pila de combustible podria ser un solució viable al problema de subministrament de petroli en un futur. Actualment s'està treballant molt en l'estudi d'aquesta solució i gran quantitat d'empreses i de cases de cotxes estan invertint grans quantitats de diners en la producció i perfecció de vehicles per ser utilitzats en la vida quotidiana. El repte per convertir l'hidrogen en combustible està en el seu emmagatzemament. Ara mateix es perfila dues opcions: l'hidrogen líquid a -253ºC, o en forma de gas a 700 bars. El primer té una major autonomia d'uns 400 km en canvi el pressuritzat té 270 Km d'autonomia.

Nosaltres explicarem el funcionament dels vehicles amb piles d'hidrogen, les qual utilitzen hidrogen en forma de gas. Actualment, les piles de combustible han aconseguit un bon nivell d'eficàcia que permet 2 kW per litre i quilo del pes del vehicle amb pressions variables de 1,5 i 2,7 bars. Un motor de 60 kW (82 CV) permet arribar a velocitats relativament acceptables per a la conducció en la xarxa de carreteres. Encara que s'ha treballat molt, els problemes de pes en els cotxes i rendiment entre altres encara s'han de solucionar, i arribar al final del camí per poder aconseguir el cotxe d'hidrogen del futur.

2.1 Funcionament

Per produir l'hidrogen primer de tot s'utilitza una cel·la fotoelèctrica, gràcies a la qual obtenim l'energia elèctrica suficient per a un tanc ple d'aigua, fem la seva electròlisi. Prèviament s'ha fer tractar el corrent elèctric per tal que puguem fer una electròlisi satisfactòria. Un cop feta l'electròlisi és comprimeix el gas hidrogen i es filtra per optimitzar la seva puresa; tot seguit s'emmagatzema en uns tanc a grans pressions.

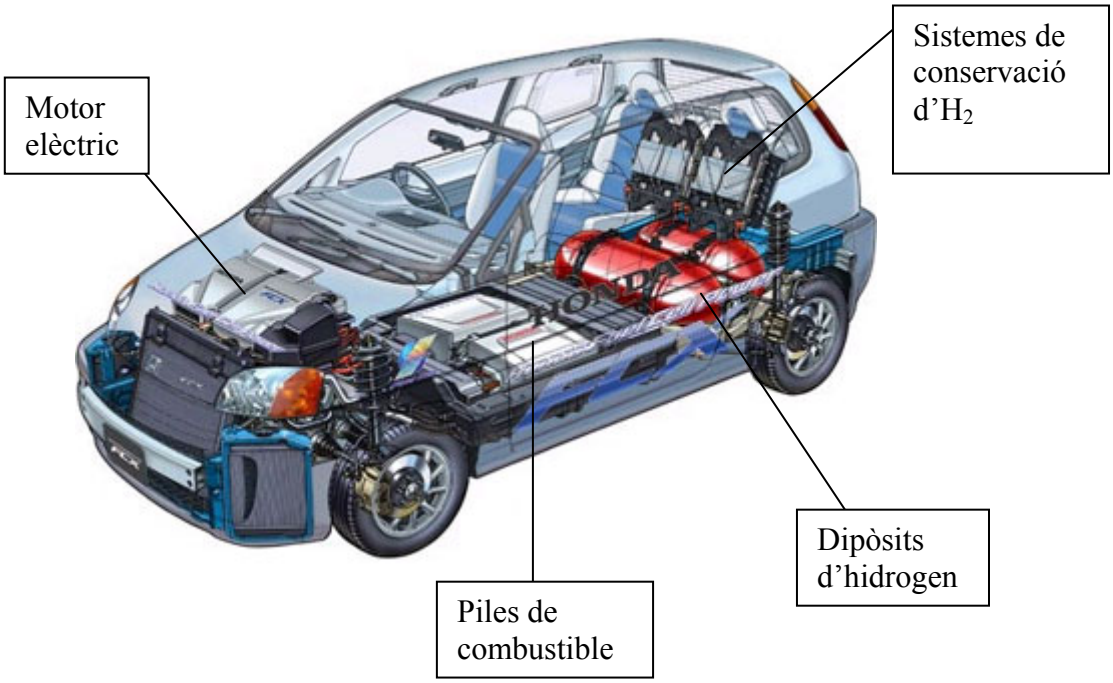


Esquema de producció d'hidrogen per electròlisi.

Les piles d'hidrogen a part de poder ser utilitzades per vehicles convencionals com motos, cotxes o camions, també s'estudia el seu us en avions i altres vehicles mòbils utilitzats en les indústries.

Aquí es on comença el desenvolupament actual per part d'algunes empreses que volen millorar els processos següents: un cop es té el gas emmagatzemat (estació de serveis) i s'injecta al dipòsit del vehicle.

En el moment en què l'hidrogen està en els dipòsits dins del vehicle, mitjançant uns conductes va a parar a les piles de combustible. Dins de les piles l'hidrogen es combina amb l'oxigen de l'ambient i produeixen un corrent elèctric. Aquest farà moure un motor elèctric convencional i com a residu s'obté vapor d'aigua. Per moure el cotxe és un sistema semblant al dels cotxes teledirigits elèctrics o al sistemes de direcció i transmissió d'un cotxe actual, els quals mitjançant el corrent aportat per una bateria , en el nostre cas la pila de combustible, fan moure la direcció i el moviment del vehicle en si.



* Cotxe ***Honda FXC- V3*** de proves propulsat per hidrogen.

2.2 Projectes actuals d'hidrogen per als vehicles arreu del món

Daimler Chrysler: L'empresa americana ha comunicat l'existència de la furgoneta Town and Country impulsada per hidrogen i també un segon vehicle amb pila de combustibles basat en el Jeep Commander, el qual utilitza hidrogen reformat dins del cotxe a partir de metanol. Aquest últim és una híbrid que utilitza hidrogen i bateries de níquel hidrur metàl·lic per proveir energia suplementària durant l'acceleració.

Ford Motor Corporation: Un grup d'enginyers, científics i especialistes en el mercat de Ford Motor Company, van establir un rècord nacional de duració amb el Ford P2000 de pila de combustible que va viatjar 2000 quilòmetres durant 24 hores a una velocitat mitjana de 104 km/h. Actualment estan desenvolupant un nou model basat en el Ford Focus i en el Ford Fiesta en versió híbrida.

General Motors: General Motors Corporation i FedEx Corporation plantegen llançar un projecte conjunt el pròxim any a Tokyo, que examinarà l'ús de vehicles amb pila de combustible, per serveis de correu. Aquests estan basats en el minivan Opel Zafira i el seu nom correcte es hydrogen III; de cotxe que ja ha estat provat a Europa amb bons resultats.

Fiat: Fiat va presentar el prototipus del seu primer vehicle amb pila d'hidrogen, Seicento Electra H2 Fuel CEll. El cotxe de dues places va ser desenvolupat amb l'ajuda del Ministeri de medi ambient italià.

Peugeot/Citroen: Aquestes dues marques treballen juntament amb Reanult per accelerar el desenvolupament d'un cotxe viable per a 2010. PSA Peugeot /Citroen està al capdavant del projecte HYDRO-GEN, construint un cotxe de pila de combustible PEMFC de segona generació amb un sistema de piles de l'empresa De Nora.

BMW: La marca d'automòbils alemanya anuncià els plans per donar a conèixer un Mini Cooper alimentat per hidrogen, amb una màquina de combustió interna. També planeja fabricar un número no especificat de cotxes de la sèrie 7 amb piles de combustible de UTC Fuel Cells. El vehicle funcionarà amb hidrogen per motor de combustió interna; la pila de combustible alimentarà el sistema elèctric dins del cotxe.

Honda: Honda va començar a provar el seu vehicle de pila de combustible FCX a organitzacions interessades a finals de 2002. El FCX, amb un tanc d'emmagatzemament de 157 litres d'hidrogen comprimit, és capaç de viatjar 335 km sense haver de parar a posar combustible i pot arribar a velocitats de fins a 150 km/h. La ciutat de Los Angeles ha acordat comprar-ne vuit. Aquest model s'ha anat retocant fins a fer dos models superiors més perfeccionats amb tecnologies Ballard. (FCX-V2 i FCX-V3).

Hyundai: El Santa FE de Hyundai, alimentat per una pila d'hidrogen PEM de 75 kW, va ser una dels millors prototips de cotxe mediambiental en una prova feta per Michelin. Aquest vehicle de zero emissions conté, a part de la pila, una bateria convencional per arrancar el cotxe. A part del Santa Fe, Hyundai treballa amb la seva filial Kia Motors Corp. en altres vehicles per l'estil o híbrids.

Renault: Renault SA de França i la Nissan Motor Co. han decidit desenvolupar cotxes amb pila d'hidrogen. S'està provant en la versió de Renault Laguna un tipus de pila PEM que utilitza hidrogen líquid emmagatzemat.

Volkswagen/Volvo: Volks wagen ha desenvolupat el seu propi cotxe propulsat per una pila de combustible, va ser presentat en les instal·lacions del California Fuel Cell Partnership. El vehicle s'anomena't Bora HyMotion. La pila d'hidrogen proporciona un corrent elèctric a un motor elèctric que dona potencia de 75 kW.

Toyota: Toyota Motor Coporation va iniciar els seus passos amb les piles d'hidrogen a la Universitat de Califòrnia al Desembre de 2002. D'allà va sortir el vehicle híbrid FCHV-4 que té una autonomia de 250 km. Actualment estan desenvolupant models superiors al FCHV-4 i de l'actual RAV4 que utilitzen motors PEM.

Nissan: Nissan va presentar el seu X-TRAIL FCV, vehicle amb pila de combustible alimentat per hidrogen que proporciona 75kW de la companyia UTC Fuel Cells a Tokio. El cotxe es el primer produït sota els acords firmat per Nissan i UTCFC per desenvolupar piles i components per a aquests cotxes. Juntament també amb Renault fa proves d'aquest cotxe pels carrers de Tokio alimentant els cotxes amb hidrogen comprimit.

Com hem pogut veure, gran quantitat de les empreses fabricants d'automòbils tenen projectes en marxa en l'actualitat algunes d'elles agrupades entre si. Però no només volen fer funcionar cotxes amb piles de combustió d'hidrogen, sinó també camions, avions i autobusos que en les principals ciutats europees ja són en funcionament.

D. Equivalents energètics combustibles/hydrogen

Font: The Hydrogen World View by Roger Billings – American Academy of Science 1991, Diesel Fuels and Motor Gasolines Technical Review (FTR-1. FTR-2) by Chevron Products Company 1996 – 1998

Font energia equivalent	**Nm^3 H_2 Gas**	**Pie^3 std H_2 Gas**	**Litre H_2 líquid**	**Galó H_2 Líquid**	**Kg H_2**	**Lliura H_2**
Litre de gasolina	0,352	0,00929	0,279	1,06	3,96	1,78
Litre de Metanol	0,676	0,0178	0,536	2,03	7,55	3,41
Litre gasoil	0,279	0,00737	0,221	0,837	3,12	1,41
Litre de fuel Jet	0,287	0,00757	0,227	0,860	3,20	1,45
Peu^3 std, Metà	11,4	0,301	9,05	34,2	128	57,6
Peu^3, Propà	4,48	0,118	3,55	13,4	50,1	22,6
Peu^3, butà	3,45	0,091	2,73	10,3	38,5	17,4
Tm carbó antracita	0,000397	0,0000105	0,000315	0,0119	0,00444	0,0020
Tm carbó bituminós	0,000392	0,0000104	0,000311	0,00118	0,00438	0,00198
Tm carbó de lignit	0,000731	0,0000193	0,000579	0,00219	0,00816	0,00369
Barril de cru	0,00176	0,0000466	0,00140	0,00529	0,0197	0,00890
Galó, gasolina	0,0930	0,00246	0,0737	0,279	1,04	0,469
Galó, metanol	0,179	0,00471	0,142	0,535	1,99	0,901
Galó, gasoil	0,0738	0,00195	0,0584	0,221	0,824	0,372
Galó, fuel jet	0,076	0,00200	0,06	0,227	0,846	0,382
NM^3, H_2 gas	1,0	0,0264	0,792	3,0	11,2	5,04
Pie^3 std, H_2 gas	37,9	1,0	30,0	114	423	191
Litre, H_2 líquid	1,26	0,0333	1,0	3,78	14,1	6,40
Galó, H_2 líquid	0,334	0,00880	0,264	1,0	3,72	1,69
Quilograms H_2	0,0896	0,00236	0,0709	0,268	1,0	0,454
Lliures H_2	0,198	0,00521	0,156	0,592	2,20	1,0
Tm H_2	0,0000987	0,0000026	0,00000782	0,000296	0,0011	0,0050
kWh	3,00	0,0791	2,38	8,99	33,5	15,1
MWh	0,003	0,0000791	0,00238	0,00899	0,0335	0,0151
H_2 Hig HV GJ	0,0128	0,000319	0,,101	0,0383	0,143	0,0644
H_2 High HV milions Btu	12,100	0,000319	0,0096	0,0363	0,135	0,0610
H_2 High HV Btu	12,100	319	9,600	36,300	135,000	61,000
H_2 High HV KILOCALORIES kilocalories	3,100	80,5	2,400	9,100	34,100	15,400
H_2 Low HV GJ	0,0108	0,000285	0,0086	0,0324	0,121	0,0544
H_2 Low HV milions Btu	0,0102	0,000270	0,0081	0,0307	0,114	0,0516
H_2 Low HV Btu	10,200	270	8,100	30,700	114,000	51,600
H_2 Low HV kilocalories	2,600	68	2,040	7,700	28,800	13,000

1 Peu^3	0,0283168 m^3
1 Galó [US, líquid]	3,7854118 litres
1 Btu	1,055,0559 Joule