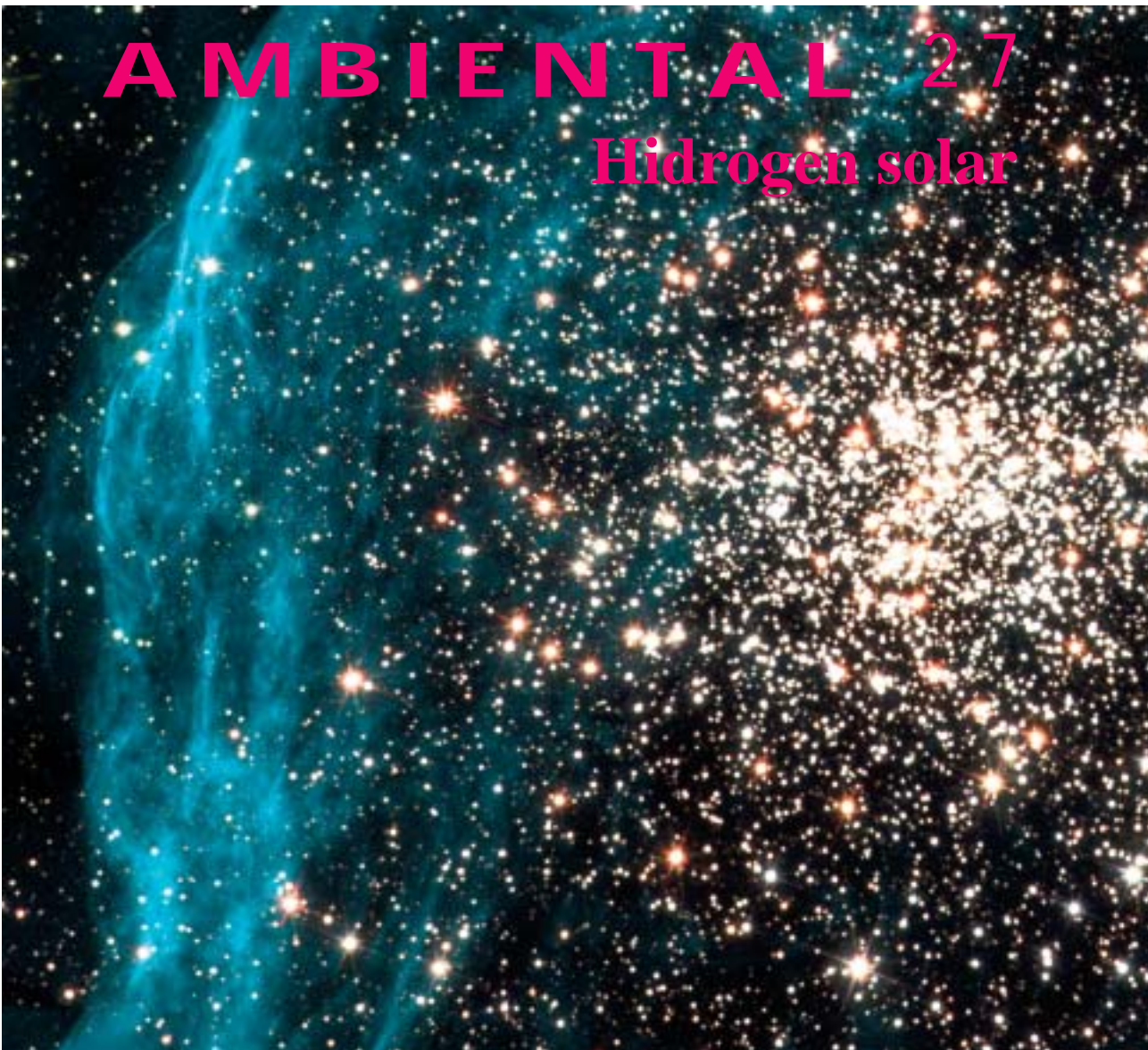


PERSPECTIVA

AMBIENTAL 27

Hydrogen solar



Abril 2003

P E R S P E C T I V A A M B I E N T A L 27

Edició:

Associació de Mestres Rosa Sensat
Drassanes , 3 • 08001 Barcelona
• Tel: 934 817 373 • Fax: 933 017 5 50
Fundació TERRA
Avinyó, 44 • 08002 Barcelona
• Tel: 936 011 636 • Fax: 936 011 632
<http://www.ecoterra.org>. Web on trobar la col·lecció sencera de tots els quaderns d'educació ambiental PERSPECTIVA AMBIENTAL en format PDF Acrobat d'ADOBE que es publica des de l'any 1995.

Redacció:

Lali Roca

Foto portada: l'univers és bàsicament hidrogen

Cúmulo estel·lar NGC 1850 del Núvol de Magallanes feta pel telescopi espacial Hubble.

Fotos interiors:

Hubblesite.org, Ballard Power Systems, Proton Motor, NASA, Honda i altres.

Il·lustracions

Equip terra.org

Imprès sense fotolits amb el sistema Computer to Print. Autoedició feta en ordinadors alimentats amb energia fotovoltaica. Maquetat amb Adobe Page Maker 7.0

Impressió:

Romanyà-Valls

Imprès en paper ecològic

Dipòsit Legal: B. 2090-1975

Hidrogen solar

El final de l'era del petroli
Les propietats de l'hidrogen
Història de l'hidrogen
Els usos de l'hidrogen
Fonts de producció d'hidrogen
Les cèl·lules de combustible
Història de les cèl·lules de combustible
Tipus de cèl·lules de combustible
Aplicacions de les piles de combustible
L'hidrogen en els mitjans de transport
Infraestructures per a l'hidrogen
Sistemes de transport
Seguretat i informació
L'economia de l'hidrogen
L'impacte ambiental de l'hidrogen

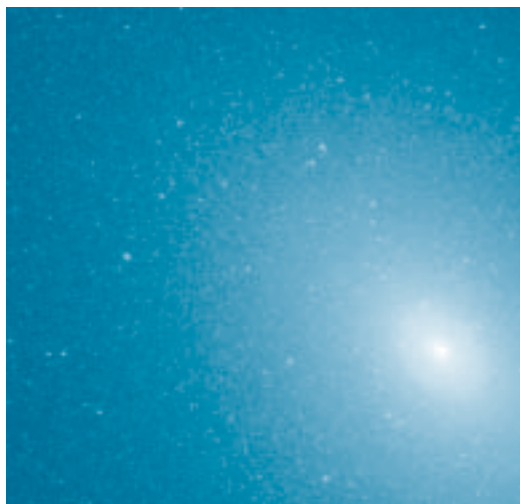
Fem hidrogen

Electròlisi
Una visita obligada
Kits pedagògics d'hidrogen
Construction 30 d'Eitech
El cotxe d'hidrogen de KOSMOS
Recursos, bibliografia i internet

L'hidrogen és l'element químic més simple, però potser és la solució d'un dels problemes més greus generats per la civilització humana: la dependència dels combustibles fòssils. No es troba disponible en forma lliure, però dos terços de l'univers contenen hidrogen. No és una font d'energia, però l'emmagatzema. Comprendre les possibilitats energètiques de l'hidrogen és un dels reptes en aquest començament del segle XXI.

Hidrogen solar

*Fundació TERRA**



* La Fundació TERRA és una fundació privada que té per objectiu canalitzar i fomentar iniciatives que afavoreixin una responsabilitat més gran de la societat en els temes ambientals.

El final de l'era del petroli

La dependència del petroli en la nostra civilització és enorme. Els Estats Units, per exemple, amb un 5 % de la població mundial consumeixen gairebé el 26 % de tot el petroli que s'extreu al planeta. La producció de petroli dels Estats Units és de l'11 % i posseeix el 2 % de les reserves globals. Les reserves dels Estats Units no superen els 3.700 milions de tones. És a dir, que en uns 10 anys s'hauran acabat o, potser fins i tot abans, si no es llencen sobre els territoris d'Alaska.

En el cas de la Unió Europea el consum d'energia prové majoritàriament de combustibles fòssils (41 % de petroli, 22 % de gas natural i 16 % de carbó), les centrals nuclears aporten un 15 % i les energies renovables només un 6 %. Corregir aquesta dependència no és fàcil. A la Unió Europea el sector del transport representa entre un 4 % i un 10 %

del Producte Interior Brut i al seu torn consumeix un 40 % de l'energia i es preveu que el tràfic de passatgers i mercaderies en els propers vint anys augmenti entre un 20 % i un 30 % respectivament. El consum en petroli per càpita l'any 2001 a l'Estat espanyol fou de 159 barrils (1 barril=158,98 litres) gairebé la meitat que la d'un ciutadà nord-americà. El consum diari a tot Europa fou de 16 milions de barrils diaris i als Estats Units de 19 milions. Una xifra que no ha parat de créixer en les darreres dècades.

L'Iraq disposa d'unes reserves de 15.200 milions de tones (aproximadament 112.000 milions de barrils). Comptant el preu del petroli a 30 dòlars el barril el valor del petroli iraquità és d'uns 3,36 bilions de dòlars. Una guerra contra l'Iraq pot representar un cost no superior als 100.000 milions de dòlars, és a dir 34 vegades menys que els beneficis que poden generar les reserves iraquianes.

Els experts en petroli afirmen que les reserves de petroli recuperable estimades se situen entre 1,8 i 2,2 milions de barrils anuals. El món ha consumit ja més de 875.000 milions de barrils d'aquest total. La demanda anual de petroli se situa en uns 30.000 milions de barrils i podria arribar als

45.000 milions abans del 2020 si continua al ritme actual. El 70 % del petroli que es subministra actualment fou descobert a partir dels anys setanta. Per cada barril de petroli que es descobreix a l'actualitat en consumim quatre.

Si la Xina i l'Índia volen aconseguir el nivell de consum de petroli per cap que té Corea del Sud es necessitarien 45.000 milions de barrils anuals. Si la demanda mundial de petroli és actualment d'uns 30.000 milions de barrils l'any, això implicaria incrementar un 60 % més la demanda mundial de l'any 2000. Els experts poden ser optimistes en les reserves mundials de petroli, però aquest producte és prou valuós com per emprar-lo com a combustible i volatilitzar-lo en gasos tòxics per a l'atmosfera que respirem. Per altra banda, el risc que comporta l'addicció al petroli quan aquest deixi de ser barat pot contribuir a l'enfonsament de l'actual civilització si no posem remei a la dependència del cru.

La nostra societat disposa de més de 500.000 productes derivats del petroli: fertilitzants (per fer créixer aliments), medicines, plàstics, aïllants, ordinadors, pintures, dissolvents, detergents; productes tan quotidians com l'aspirina, un CD rom, un pintaungles o un xiclet depenen del petroli per existir.

La nostra civilització del petroli es basa en el procés de transformació de l'energia més jerarquitzada i centralitzada de la història de la humanitat. Tampoc no podem oblidar les 6.000 milions de tones de diòxid de carboni alliberades l'any 2000 de les quals el 75 % es deu a la crema de petroli. Certament, l'economia fòssil demana un relleu si no volem evitar l'atzucac de la humanitat. Tanmateix, qualsevol altra font d'energia exigeix assumir primer el concepte d'eficiència energètica i de frugalitat, dos valors encara molt poc assumits per la nostra societat opulenta.



L'hidrogen emmagatzema 2,6 vegades més d'energia per unitat de massa que la gasolina. Per aquesta raó els cotxes d'hidrogen poden tenir futur.

Els combustibles fòssils aporten el 85 % de les necessitats energètiques del món: un 40 % corresponen al petroli, el 22 % al carbó i el 23 % al gas natural. Hem multiplicat per 70 el consum mundial d'energia.

Les propietats de l'hidrogen

L'hidrogen és un gas incolor, inodor i no tòxic. És l'element més lleuger i abundant a la natura. La seva densitat és de 0,0899 g/l. És a dir 14,4 vegades menys dens que l'aire. Constitueix aproximadament el 80 % de la massa de tota la matèria de l'univers i és present en el 90 % de les molècules. El Sol, per exemple, és gairebé 100 % hidrogen pur i tota l'energia que ens envia prové de la fusió dels àtoms d'hidrogen. A altes temperatures i pressions l'hidrogen es converteix en sòlid, en un metall. A baixes temperatures (al voltant dels $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) és un líquid. Aquest és el cas d'alguns planetes com ara Júpiter la superfície del qual és essencialment hidrogen líquid.

Quant a les característiques com a combustible cal destacar que crema a l'aire lliure quan hi ha concentracions entre 4 i 75 % del seu volum (el gas natural ho fa entre 5,4 i 15 %). La temperatura per combustió espontània és de $585\text{ }^{\circ}\text{C}$ mentre que per al gas natural és de $540\text{ }^{\circ}\text{C}$. El gas natural és molt més explosiu (ho fa a concentracions de 6,3 % a 14 %) que no pas l'hidrogen (necessita concentracions d'entre el 13 % i el 64 %).

Al nostre planeta, l'hidrogen rares vegades es troba en forma lliure. La major part està unit a l'oxigen formant aigua. Per això, les autèntiques mines d'hidrogen són els oceans, l'aigua dolça i els gels. Tanmateix, els hidrocarburs també són una important font d'hidrogen. Per exemple, el metà (CH_4) té quatre àtoms d'hidrogen per un de carbó. La biomassa (les restes de plantes i animals) també contenen hidrogen.

Un dels errors més comuns és pensar que l'hidrogen és una font d'energia primària (com el gas o el petroli) que existeixen en forma lliure a la natura. Es tracta d'un vector energètic, una forma secundària d'energia que cal transformar amb altres fonts primàries. L'hidrogen, doncs, no es pot considerar un combustible de primera si és que aquest el definim com qualsevol substància capaç de produir un balanç net de calories energètiques en un procés econòmicament raonable. L'hidrogen requereix una important font d'energia per extreure'l en forma energèticament aprofitable. A diferència del petroli, el gas o un isòtop radioactiu que es poden considerar fonts d'energia, l'hidrogen és, doncs, un vector, un portador d'energia que ens permet produir una altra font d'energia (per exemple, electricitat, i amb ella obtenir energia lluminosa, calorífica, etc.). En canvi, el gas natural, per ell mateix genera calor o llum.

Tanmateix, l'hidrogen com a combustible presenta alguns avantatges. Per exemple, la densitat respecte al volum de l'hidrogen (2,53 kWh/litre) és quatre vegades més baixa que la de la gasolina (8,76 kWh/l). Ara bé, si considerem la quantitat d'energia en relació amb el pes llavors la de l'hidrogen és més alta. L'hidrogen líquid té un pes de 70,99 g/



Llançament del transbordador espacial. Per posar en òrbita aquest giny a 300 km d'alçada es tarda uns 45 minuts i es cremen un 2 milions de litres d'hidrogen i oxigen líquid.

1. Un quilo d'hidrogen genera la mateixa energia que 2,1 kg de gas natural o 2,8 de gasolina. Si ho comparem amb el gas natural, llavors l'hidrogen aporta entre 33,33 kWh/kg i 39,41 kWh/kg mentre que el gas natural menys de la meitat, és a dir, entre 13,90 kWh/kg i 15,42 kWh/kg. En canvi si ho mesurem en volum, llavors són 2,9 kWh/m³ i 3,51 kWh/m³ i el gas natural aporta entre 9,97 kWh/m³ i 11,06 kWh/m³. Metalls com el pal·ladi (Pd) poden absorbir fins a 850 vegades el seu volum en hidrogen i per això

es pot emprar com a reductor. Les dissolucions coloidals de pal·ladi permeten absorbir fins a 3.000 vegades el seu volum amb hidrogen. Aquesta propietat d'absorció de l'hidrogen és la base de l'anomenada fusió freda.

Per la seva composició química no genera compostos que puguin causar pluja àcida, llevat dels òxids de nitrogen, quan s'empra com a combustible en un motor de combustió interna.

Un altre factor important per apostar per

Història de l'hidrogen

És curiós que l'element més abundant de l'univers se'ns amagui als nostres sentits. Sembla que el primer experiment en el qual es va produir hidrogen es deu al físic Teofrast Paracelsus (1493-1541) però es va pensar que eren gasos inflamables. No fou intuït fins al segle XVII quan el 1697 el físic alemany Georg Ernst Stahl (1660-1734) va definir el flogist com una substància que desapareixia durant la combustió. El noble Henry Cavendish (1731-1810) fou el primer a descobrir i descriure les qualitats de l'hidrogen però no el va identificar com a element, tot i que va afirmar que hi havia dos tipus d'aire: l'aire fix (CO₂) i l'aire inflamable (hidrogen) i que era 1/4 més pesat que l'aire. El físic francès Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) a partir de les observacions de Cavendish, l'any 1783 va separar l'oxigen i l'hidrogen de l'aigua i a continuació els va combinar produint 45 g d'aigua. Va anomenar oxigen "l'aire que sustenta la vida" i hidrogen "l'aire inflamable" (que en grec significa «productor de l'aigua»).

El 1874 Juli Verne, cent anys abans que comencessin les recerques modernes amb l'hidrogen, va escriure *L'illa misteriosa* en la qual profetitzava en boca de l'enginyer Cyrus Harding «crec que algun dia s'emprarà l'aigua com a combustible, que l'hidrogen i l'oxigen que la componen, ja sigui junts o separats, proporcionaran una font inexhaurible de llum i calor, d'una intensitat de la qual el carbó no és capaç. L'aigua serà el carbó del futur».

La producció d'hidrogen no començaria fins al 1920 que es van construir els primers electrolitzadors per obtenir hidrogen i oxigen. Però, l'hidrogen es féu famós per l'ús que en feren els enginyers dels zepelins alemanys barrejant-lo en una proporció de 10:1 en la mescla que empraven com a combustible. Aquesta barreja els conferia un major rendiment i, per tant, més velocitat.

Entre el 1930 i els anys quaranta un dels principals entusiastes en l'ús de l'hidrogen fou l'alemany Rudolf Erren que va fabricar camions, autobusos, submarins que empraven hidrogen i altres combustibles en motors de combustió interna. Després de la Segona Guerra Mundial l'interès per les cèl·lules de combustible anticipades per William Grove (1811-1869) vindria de la mà del científic anglès Francis T. Bacon els anys cinquanta que va desenvolupar la primera cèl·lula d'hidrogen-aire i que tindria un gran importància en el programa espacial americà.

Tanmateix, la visió d'una "economia de l'hidrogen" fet amb energia solar fou proposat el 1962 per l'electroquímic australià John Bockris. Aquest científic també va assessorar la General Motors i va augurar que "l'hidrogen seria el combustible de tots els mitjans de transport". L'era de l'hidrogen, primer de la mà de la indústria de l'espai i, posteriorment, de l'automoció havia començat.

Som a les beceroles d'una nova era energètica, però la lluita contra la contaminació dels combustibles fòssils i la democratització de l'energia depenen de com es desenvolupi la tecnologia de l'hidrogen com a vector energètic.

l'hidrogen és que es pot emmagatzemar a alta pressió, barrejat amb certs components com ara fibres microscòpiques de carboni i en estat líquid. L'hidrogen líquid a baixa temperatura és idoni per a motors de combustió interna i podria ser un substitut excel·lent per als reactors dels avions. En forma de metall hidrur esdevé un combustible molt segur i que no té resistència elèctrica, fet que el fa idoni en el camp de l'electrònica.

El usos de l'hidrogen

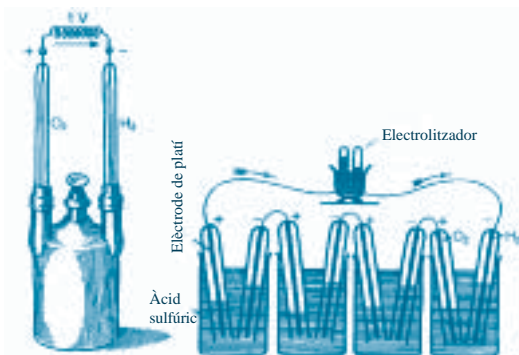
Anualment, al món ja es produeixen més de 500 mil milions de metres cúbics d'hidrogen (45 milions de tones) que s'emmagatzemen, es transporten i s'utilitzen. La major part d'aquest hidrogen l'empra la indústria química per a l'obtenció de productes com ara fertilitzants basats en l'amoníac (un 50 %) i per a la hidrogenació d'olis orgànics comestibles. També es fa servir per produir el plàstic polipropilè (amb el qual es fan entre altres teixits, canonades, etc.). Tanmateix, l'interès de l'hidrogen com a combustible va començar a prendre força amb la crisi del petroli del 1973. La major part de l'hidrogen s'obté de la reformació del gas natural amb vapor, però tot i ser barat deixa com a subproducte diòxid de carboni.

La clau de l'hidrogen és la seva producció amb energia solar ja que la Terra rep en 40 minuts la mateixa energia que consumim en un any. Saber captar l'energia solar quan fa Sol per emmagatzemar-la en hidrogen és la clau de l'èxit per abandonar l'economia fòssil i entrar en l'economia de l'hidrogen. La primera planta d'hidrogen solar es va inaugurar el 26 de setembre de 1995 a El Segundo (Califòrnia, EUA). S'han fet altres experiments; només cal entossudir-se que amb els combustibles fòssils no hi ha futur.

Fonts de producció d'hidrogen

Una de les preguntes més importants que ens podem fer és: d'on prové l'hidrogen? El mètode d'on obtinguem l'hidrogen serà una decisió crítica ambientalment parlant. Per exemple, si l'hidrogen prové de l'electròlisi de l'aigua pot comportar una gran despesa d'energia elèctrica. Si per contra s'implanta l'electròlisi gravitacional, l'economia de l'hidrogen podria ser un boom com ho fou la tecnologia del microxip per als ordinadors personals. També es pot generar en una central tèrmica cremant carbó o escombraries. Ara bé, la qüestió és que la producció d'hidrogen contribueixi a una reducció de les emissions de diòxid de carboni.

L'extracció de l'hidrogen del metà de les escombraries podria provocar un increment de metalls pesats, dioxines i altres contaminants i tòxics a l'atmosfera. Si l'electròlisi s'alimenta de sistemes d'energies renovables, com ara els panells solars fotovoltaics, els aerogeneradors o les centrals minihidràuliques, llavors no es produeixen emissions a l'atmosfera. Heus ací, doncs, que el mètode que escollim per obtenir l'hidrogen pot ser decisiu per al necessari canvi del sistema energètic. Un nou sistema energètic que eviti els abocaments de diòxid de carboni a l'atmosfera i permeti complir els compro-



Cèl·lula de Grove (1839).

Bateria de gas de William Grove (1842) que no va considerar que fos un giny pràctic.

misos internacionals de lluita contra el canvi climàtic. La tria de la metodologia emprada per a l'obtenció d'hidrogen serà feta d'acord amb el creixement/evolució de la indústria de la pila de combustible.

Reformació dels hidrocarburs

A curt termini, a causa de l'abundància de gas natural, la disponibilitat de metanol i propà i la manca d'infraestructures per produir hidrogen gas, s'espera que els hidrocarburs siguin els combustibles provisionals dominants per produir hidrogen. Actualment, amb els combustibles fòssils ja es produeixen uns 40 milions de tones d'hidrogen per a fins comercials. Aquesta producció mundial, tot i semblar molt alta, si es convertís en energia només aportarien un 1 % de la demanda energètica mundial. Tanmateix, avui, aquest hidrogen s'empra majoritàriament en altres processos industrials.



Cèl·lula de combustible de metanol que aprofita l'hidrogen d'aquest líquid per produir electricitat en una aplicació didàctica.

El procés més comú d'extracció d'hidrogen és la reformació d'hidrocarburs. Un dels sistemes és la reformació del gas natural, de fuels pesats o del carbó amb vapor d'aigua a altes temperatures i pressió elevada. En tots aquests processos s'obtenen gasos de carboni que s'alliberen a l'atmosfera.

En el darrer lustre del segle XX s'aconseguí extreure hidrogen dels combustibles fòssils, especialment del gas natural, amb una eficiència de gairebé el 100 % en un procés conegut per procés de Kvaerner desenvolupat el 1994 per l'empresa noruega Kvaerner Engineering. La descomposició es produeix en un arc de plasma a uns 1.600 °C sense generar cap tipus d'emissió, tot i que necessita una abundant font d'energia elèctrica. Tanmateix, en el cas de Noruega, l'electricitat es pot produir a baix preu amb l'energia hidràulica. Altres mètodes experimentals empen vapor a una temperatura de 815 a 870 °C amb l'ajut d'un catalitzador de níquel. El CO₂ que es produeix es pot convertir en hidrogen en un procés anomenat adsorció de pressió oscil·lant.

El desenvolupament de les piles de combustible (que comentarem en aquesta monografia) ha fet aparèixer petits aparells reformadors, especialment, de gas natural o metanol per tal de subministrar en un procés continu hidrogen a les cèl·lules. Actualment, encara no es comercialitzen, però s'incorporen en alguns models de piles de combustible. Malauradament, en els processos convencionals de reformació dels hidrocarburs per obtenir hidrogen continua produint-se una emissió de diòxid de carboni. El problema amb la reformació d'hidrocarburs com ara el gas natural o el carbó és que es tracta d'un procés molt barat i competitiu. Tanmateix, aquests mètodes no permeten alliberar-nos de la dependència dels combustibles fòssils i els problemes geoestratègics que comporten.

L'hidrogen i les energies renovables

Les energies renovables, especialment l'eòlica i la solar fotovoltaica, que generen electricitat de forma discontinua i que no sempre es pot emmagatzemar o enviar a la xarxa, tenen en l'hidrogen un vector per conservar-la. Per això, l'hidrogen complementa molt bé les limitacions de l'energia solar i viceversa, l'elevada despesa d'hidrolitzar l'aigua té en l'electricitat solar (fotovoltaica o eòlica) una magnífica aliada. Per això, podem parlar que l'energia solar i l'hidrogen són un binomi fonamental en el desenvolupament de l'economia de l'hidrogen solar. L'hidrogen i el Sol estan units des dels inicis dels temps. L'hidrogen pot ser produït sense cap emissió de diòxid de carboni a partir de sistemes renovables d'energia. En aquest cas l'energia per dissociar l'aigua en oxigen i hidrogen, tot i ser elevada, la proporciona un sistema que no contamina i pot ser molt barat en el futur.

L'oxigen i l'hidrogen separats es fan servir de combustible per obtenir novament

electricitat a través de les cèl·lules de combustible. L'avantatge de les piles de combustible que funcionen directament amb hidrogen gas és que poden ser útils per emmagatzemar l'excedent d'energia elèctrica produïda en moments de molt vent o per usar de nit en indrets amb una forta radiació solar.

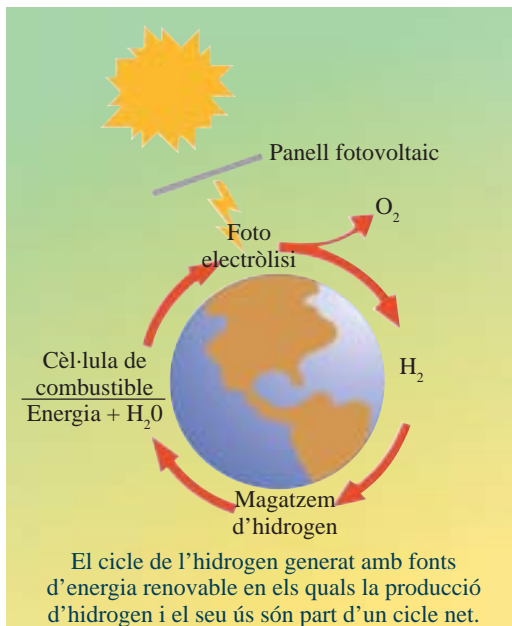
Un sistema que incorpori l'hidrogen a partir de fonts renovables conjuntament amb una pila d'hidrogen és un sistema tancat en el qual cap dels productes o reactius: l'aigua, l'hidrogen i l'oxigen es perden cap a l'ambient. L'aigua consumida per la «pila» es transforma en gasos. Al seu torn els gasos tornen a ser transformats en aigua. L'energia elèctrica produïda pels panells solars és transferida a energia química en forma de gasos. Els gasos poden ser emmagatzemats i transportats, per reconvertir-se una altra vegada en electricitat quan aquesta sigui necessària.

Aquests sistema de producció d'hidrogen amb energia renovable és realment sostenible, sempre i quan es compti amb l'energia solar, eòlica, geotèrmica o qualsevol altra font renovable per poder produir energia elèctrica allà on calgui i quan sigui necessària.

Electròlisi de l'aigua

L'electròlisi alcalina de l'aigua ha estat un mètode tradicional des de fa més de 80 anys, però, en general, associada a centrals d'energia hidràulica o geotèrmica, atesa l'elevada despesa energètica que comporta. En aquestes darreres dècades, només un 0,2 % de la producció mundial d'hidrogen es fa separant l'aigua.

La separació electrolítica consisteix en dues reaccions parcials en dos elèctrodes immersos en un recipient amb aigua, a la qual s'ha afegit un àcid o una sal. Quan es fa passar un corrent elèctric, bombolles



d'hidrogen pugen pel càtode mentre que l'oxigen es dirigeix a l'ànode. Per tal de mantenir separats aquests gasos en el recipient o electrolitzador hi ha un separador o diafragma, fet d'asbest. L'eficiència d'aquest procés és en plantes grans del 65-70 %. Es calcula que es necessiten 94 kWh per generar uns 300 m³ d'hidrogen gas dels quals s'obtenen 79 kWh d'energia.

Hi ha altres mètodes per electrolitzar l'aigua, com ara els que ho fan amb vapor d'aigua a temperatures d'uns 1.000 °C. Les recerques en aquest sistema han pogut comprovar una reducció del consum elèctric respecte a l'electròlisi convencional d'un 30-45 %. El cor d'aquest sistema és un electròlit sòlid de ceràmica, fet d'òxid de zirconi recobert d'elèctrodes porosos amb un elevat nivell de conductivitat per a l'oxigen a altes temperatures que fa que sense necessitat de cap àcid o sal tant l'hidrogen com l'oxigen vagi cada un d'ells al seu electrode.

Finalment, cal esmentar l'electròlisi amb cèl·lules de membrana (PEM) o l'electròlisi amb electròlit de polímer sòlid (SPE) en el qual l'electròlit és una membrana de fulls sòlids d'un material semblant al tefló. La conversió d'aigua en hidrogen amb aquest mètodes assoleix gairebé el 100 % de l'eficiència.

L'electròlisi gravitacional

Aquesta tecnologia l'ha desenvolupat recentment l'empresa americana Electro Hydrogen Generator (EHG). El principi és descompondre l'aigua en un electròlit que han patentat i sotmetre-la a un fort camp de forces inercials. La menor energia que es necessita respecte a la tradicional hidròlisi de l'aigua és perquè s'aprofita la font de calor generada pel camp inercial. Aquesta companyia ha batejat el procés com a electrolísi gravitacional i assegura que

assoleix una eficiència del 86 al 98 % en l'extracció d'hidrogen de l'aigua. Tant és així que el procés de l'electròlisi gravitacional permet obtenir d'un metre cúbic d'aigua 3,5 m³ d'hidrogen i 2,2 megajoules d'electricitat per segon. La producció d'un metre cúbic d'hidrogen pel procés de EGH es valora en 0,0038 \$ (al voltant dels 2 \$ pels mètodes d'electròlisi convencionals) i resulta d'entre 2,5 i 3 vegades més barat que el cost de producció i transport del mateix volum de gas natural. En un altre ordre de mesura aquest procés permet que de l'hidrogen extret d'un litre d'aigua s'obtingui la mateixa energia que permetria fer córrer un cotxe amb un litre de gasolina. En definitiva, una tecnologia emergent que pot revolucionar l'economia de l'hidrogen.

Mètodes biològics

Tot i que encara és un mètode molt experimental d'obtenció d'energia la bioproducció d'hidrogen a partir de microorganismes es perfila com una possibilitat gens menyspreable. La producció biològica d'hidrogen presenta alguns avantatges importants respecte als mètodes fotoelèctrics, químics o termoquímics. Per generar hidrogen amb organismes fotosintètics només cal un simple reactor solar com ara un



Annabaena variabilis on s'observa la producció de nitrogen en els heterocists de les cèl·lules segons estudis del Dr. Thomas Happe de la Universitat de Bonn.

recipient transparent. La baixa eficiència de la conversió biològica (un 7 %) es compensa pels petits requeriments energètics. Per exemple, algues cianobacteris com ara l'alga *Spirulina* generen hidrogen en condicions anaeròbiques i de foscor. Altres organismes com ara el cianobacteri *Anabaena cylindrica* generen hidrogen i oxigen en una atmosfera de gas argó i en absència de nitrogen. Amb soques d'*Anabaena variabilis* hupSL modificades genèticament s'ha aconseguit que l'enzim nitrogenasa, responsable de reduir el nitrogen a amoni, generi fins cinc vegades més d'hidrogen que la varietat silvestre. Recerques amb el bacteri fotosintètic *Rhodospirillum rubrum* han permès comprovar que produeix hidrogen amb l'enzim hidrogenasa a partir de l'aigua i fins i tot amb presència d'oxigen. Els experiments que s'han fet amb una alga com la *Chlamydomonas reinhardtii* demostren que aquest organisme oxida l'aigua per alliberar hidrogen quan en el seu medi habitual ric en sulfurs aquests disminueixen. Per altra banda, tenint en compte que la producció d'hidrogen electrolitzant l'aigua és molt baixa (al voltant d'un 10 % a un 12 %), s'obren moltes esperances a la producció biològica pel seu baix cost i facilitat. Aquests mecanismes de producció de biohidrogen poden ser ben aviat una nova font per obtenir hidrogen combustible.

Altres fonts

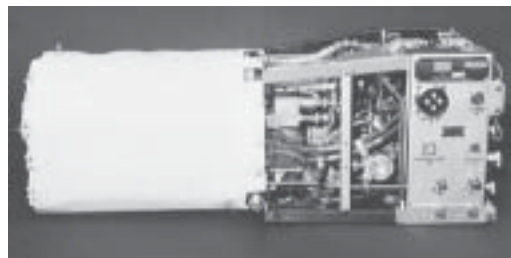
Darrerament, hi ha recerques endegades per extreure hidrogen d'on sigui possible a mesura que aquest element es configura com un substitut real dels hidrocarburs. Així hi ha processos experimentals molt recents que demostren que molècules simples derivades de la biomassa com ara la glucosa o el glicerol es poden tractar en fase aquosa per obtenir hidrogen amb una eficiència raonable

La producció d'hidrogen a partir de sucres i alcohols en un reactor de fase aquosa és un procés amb el qual, emprant com a catalitzador el platí, s'obtenen temperatures de 225-265 °C (si tenim en compte que amb les tecnologies tradicionals es necessiten temperatures de fins a 800 °C) i una pressió de 27,54 bars (així s'evita la formació de vapors). El mecanisme de formació es basa en la ruptura i reformació dels enllaços carboni-carboni i carboni-oxigen, els quals permeten crear diverses partícules intermèdies que produeixen hidrogen al reaccionar amb l'aigua del medi aquós. Durant el procés també es formen hidrocarburs simples i diòxid de carboni.

La quantitat de gas d'hidrogen format en proporció amb el producte inicial de la reacció varia entre un 36-50 % per a la glucosa i a un 51-75 % per al glicerol. Tot i que encara cal polir molts detalls del procés, la generació de gas ric en hidrogen a partir de carbohidrats extrets de biomassa renovable i altres gasos de deixalles podria ser comercialment rendible.

Les cèl·lules de combustible

Una cèl·lula de combustible és un sistema químic el qual rep hidrogen que transforma en electricitat de manera indefinida mentre se li aporta hidrogen en presència d'oxigen que genera energia i aigua. Una cèl·lula de



Cèl·lula alcalina de 12 kW construïda per Internacional Fuel Cell (EUA) i emprada en el transbordador espacial des de principis del setanta.

combustible és una estructura senzilla que consisteix en tres capes adossades. La primera capa és l'ànode, la segona l'electròlit i la tercera el càtode. L'ànode i el càtode serveixen de catalitzador. La capa del mig fa la funció d'estructura de transport, la qual absorbeix l'electròlit. L'electròlit, que pot ser líquid o sòlid, és el que distingeix els diferents tipus de piles de combustible. Atès que una cèl·lula genera un voltatge molt baix, es connecten moltes cèl·lules en sèrie per incrementar la quantitat de corrent. Un conjunt de cèl·lules de combustible s'anomena pila de combustible.

Generalment, el combustible d'on s'extreu el voltatge és l'hidrogen ja sigui en estat pur o bé prèvia transformació amb un hidrocarbur ric en hidrogen com ara el metà. La descomposició d'un hidrocarbur generarà aigua i diòxid de carboni. Per aquesta raó l'ús de l'hidrogen com a energia neta ha de provenir de la descomposició de l'aigua. Una cèl·lula de combustible és silenciosa, eficient i no genera substàncies contaminants.

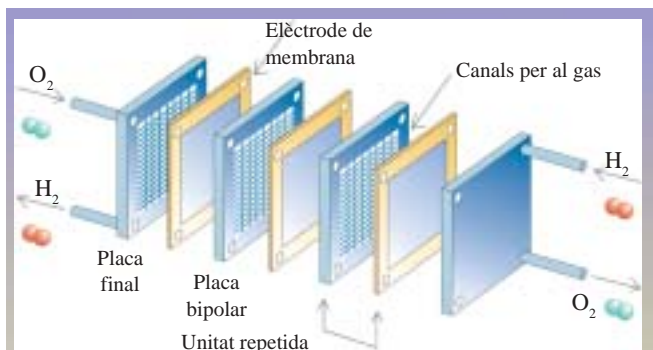
Història de les cèl·lules de combustible

La primera cèl·lula de combustible fou desenvolupada pel científic anglès William Grove (1811-69) cap a l'any 1839. El principi fou descobert per accident, mentre feia un experiment d'electròlisi. Quan va desconnectar la bateria de l'electròlisi va observar un corrent fluïnt en direcció oposada que consumia els gasos de l'hidrogen i l'oxigen la qual va anomenar "bateria de gas". Aquesta bateria de gas consistia en uns elèctrodes de platí en un bany d'àcid sulfúric diluït. El 1842 va connectar diversos vasos

en sèrie per fer una cadena de gas. Va fer servir l'electricitat generada en la cadena de gas per fer anar un electrolitzador. Malauradament, la corrosió dels elèctrodes i la inestabilitat dels materials féu creure que la cèl·lula de Grove no era pràctica.

Prop d'un segle després el químic anglès Francis Bacon va tornar a investigar en les cèl·lules de combustible i cap els anys 1950 en va produir la primera, però emprant un electròlit alcalí com l'hidròxid potàsic (KOH). L'elèctrode era una material sintètic amb pols de níquel, el qual deixava que el gas en contacte amb l'elèctrode pogués estar en contacte amb l'electròlit aquós a l'altra banda. Aquest increment en l'àrea de contacte entre els elèctrodes, els gasos i l'electròlit permetia millorar la densitat de la cèl·lula de combustible. Per altra banda, el níquel era més barat que el platí.

Els anys seixanta les missions espacials de la NASA van impulsar el desenvolupament d'una cèl·lula de combustible per a les missions Apollo. Aquest giny tenia l'avantatge respecte a les bateries convencionals d'oferir més energia amb menys pes i, a més d'electricitat, d'altra banda subministrava l'aigua necessària per als astronautes. La nau de l'Apollo que va aterrar a la Lluna anava equipada amb una pila de



Estructura d'una cèl·lula de combustible PEM en entrepà a través de la qual flueix l'hidrogen i l'oxigen.

combustible de 1,5 kW, la qual al llarg de les 18 missions Apollo va acumular més de 10.000 hores de funcionament sense cap incident.

Els anys setanta es va perfeccionar aquesta tecnologia i es va desenvolupar una pila de combustible de 12 kW alimentada amb hidrogen i oxigen líquid, la qual es va instal·lar al transbordador espacial demostrant la seva eficàcia després de 106 missions i 82.000 hores de funcionament. Les piles de combustible alcalines, tot i els grans avantatges de capacitat energètica en poc pes, no són útils en el medi terrestre perquè el diòxid de carboni contamina l'electròlit i produeix carbonat que redueix la concentració del ió hidròxid a l'electròlit. Per causa de la complexitat en l'aïllament de l'electròlit alcalí del diòxid de carboni s'han hagut d'usar nous electròlits no alcalins.

Les piles de combustible alcalines (AFC) no són idònies per a usos molt intensius ja que perden una mica de voltatge a raó de 15 a 50 mV cada mil hores de funcionament.

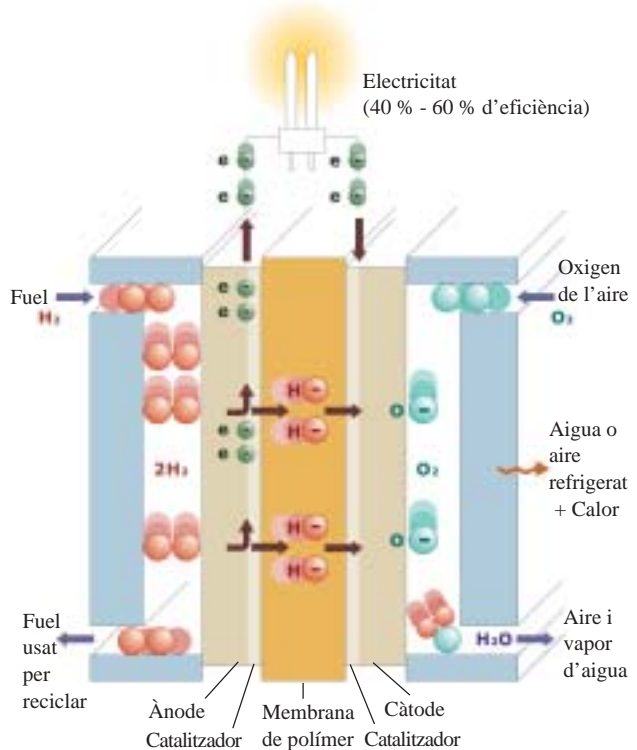
Tipus de cèl·lules de combustible

A diferència dels motors de combustió interna en els quals segons la seva tipologia hem d'escollir un combustible o un altre, en les piles de combustible aquell és sempre el mateix i el rendiment i les característiques vénen determinades per l'electròlit emprat. Així, les diferents tipologies de piles de combustible descriuen l'electròlit del qual estan fetes. Així, hi ha piles de combustible d'àcid fosfòric (PAFC), de carbonat fos (MCFC), d'òxid sòlid (SOFC) i d'electròlit

de polímer de membrana (PEM). Aquestes darreres són les que aporten avantatges més grans per a les aplicacions domèstiques i industrials, especialment en l'àrea del transport.

Les cèl·lules de polímer de membrana (PEM)

La primera cèl·lula de polímer de membrana fou desenvolupada a principis dels seixanta per General Electric (GE) a partir dels treballs dels científics Thomas Grubb i Leonard Niedrach. Es van provar per instal·lar-les en el programa espacial Gemini. Tanmateix, per causa dels problemes amb la difusió de l'oxigen a través de la membrana només es van instal·lar a les sis darreres missions Gemini. Es tractava d'una pila de combustible de 1.000 wats. Tanmateix, les



Detall del funcionament d'una cèl·lula PEM en la placa de l'electrode per apreciar com flueixen els electrons.

piles PEM de GE tenien una gran limitació per la important quantitat de platí que necessitaven com a catalitzador en els elèctrodes.

El 1983 el geofísic canadenc, Geoffrey Ballard, el químic Keith Prater i l'enginyer Paul Howard fundaren l'empresa Ballard Power. La Ballard va prendre la patent de la cèl·lula de combustible que ja havia caducat i van començar a investigar per millorar-la a fi que fos més potent i barata. Gràcies a un contracte amb l'exèrcit canadenc, la Ballard va poder desenvolupar una cèl·lula de combustible amb més densitat energètica i amb molt menys platí. Alhora, en van reduir la mida. Avui, la Ballard Power és l'empresa líder en la fabricació de piles de combustible PEM amb un rang de potències que van des de 1 kW per a aplicacions domèstiques fins a

250 kW per a usos comercials i industrials. Una de les eines polítiques que han contribuït a desenvolupar les piles de combustible ha estat el Programa de Vehicles de Baixa Emissió del Govern de Califòrnia sorgit a partir de la Llei de l'Aire de Califòrnia. Aquest programa establia que a principis del 2003 el 10 % dels cotxes venuts a Califòrnia no havien de ser contaminants (Zero Emissions Vehicles). Els cotxes elèctrics i amb cèl·lula d'hidrogen eren els principals candidats.

El funcionament d'una cèl·lula de combustible de polímer de membrana

En una cèl·lula de combustible PEM es donen dues reaccions simultàniament: una oxidació (pèrdua d'electrons) a l'ànode i una reducció (guany d'electrons) al càtode.

Incerteses sobre les piles d'hidrògen

- 1) La pila d'hidrogen haurà de tenir una acceptació en el mercat per tenir èxit. Aquesta acceptació depèn clarament del preu, la exactitud, la longevitat de la pila d'hidrogen i l'accessibilitat al preu del combustible. Comparat amb el preu de les actuals alternatives, com per exemple l'enginyeria del dièsel i les bateries, les piles d'hidrogen són realment cares. Per ser competitives, les piles d'hidrogen han de ser produïdes amb materials que tinguin un menor cost.
- 2) Desenvolupament d'infraestructures per al mercat. Actualment no existeixen infraestructures enlloc per a aquest tipus de combustibles. És per això que nosaltres hem de confiar en les activitats de les companyies petrolieres i de gas per tal que ells ho introdueixin. Només si els conductors són capaços d'obtenir el combustible a un preu raonable, seran desenvolupades unes noves aplicacions per al motor.
- 3) Actualment un gran nombre d'inversions en piles de combustible i en la tecnologia de l'hidrogen provenen de les indústries de cotxes. Val a dir que, si les piles d'hidrogen no són necessàries per a la indústria de l'automòbil, seran necessàries unes noves inversions per a l'aplicació de pila d'hidrogen.
- 4) Canvis en la política del govern podran dificultar el desenvolupament de la pila d'hidrogen i de la tecnologia de l'hidrogen. Les actuals lleis i regulacions ambientals extremadament rigoroses, com per exemple el Programa de reducció d'emissió de vehicles a Califòrnia, ha reforçat aquest camp. L'incompliment de les lleis per part de la indústria ha estat un gran implus per al desenvolupament de les estacions generadores d'energia. Si aquestes lleis canvien, això podria repercutir negativament en el desenvolupament.
- 5) Actualment el platí és el component clau de la pila d'hidrogen. El platí és un recurs natural escàs; la majoria de fonts d'on prové aquest metall són de Sud-àfrica, Rússia i Canadà. L'escassetat de platí no està prevista en el desenvolupament de la pila d'hidrogen, tot i que els canvis en les polítiques del govern poden afectar la font d'aquest element.

Aquestes dues reaccions permeten una reacció d'oxidació-reducció (redox) total que permet la formació d'aigua a partir d'hidrogen i oxigen gas.

Com si es tractés d'un electrolitzador, l'ànode i el càtode estan separats per un electròlit, el qual permet als ions ser transferits d'un costat a l'altra. L'electròlit d'una cèl·lula PEM és un àcid sòlid incorporat en una membrana (polímer sulfonatat). L'electròlit àcid sòlid està saturat amb aigua per facilitar el transport dels ions. Les cèl·lules de combustible PEM són sensibles a la contaminació per monòxid de carboni, el qual fa perdre efectivitat a l'ànode; per això, perquè la reacció d'hidrogen amb l'oxigen de l'aire es produeixi, aquest s'ha de filtrar prèviament. Actualment, el cost d'una cèl·lula de combustible és d'uns 4.000 euros/kW (com a referència, aproximadament l'energia eòlica té un cost d'uns 1.000 euros/kW mentre que l'energia solar fotovoltaica és d'uns 6.000 euros/kW).

La química d'una pila

Les reaccions que s'esdevenen a l'interior d'una pila d'hidrogen són:



En l'ànode, les molècules d'hidrogen entren en 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 amb l'aigua per formar el ió hidròni (H_3O^+), que es desplaçarà cap al càtode a través de la membrana (electròlit), deixant lliure el

Beneficis

- 1) Les piles d'hidrogen són eficients: ja que transformen l'hidrogen i l'oxigen directament en electricitat i aigua sense cap mena de combustió en el procés. L'eficiència del procés se situa entre el 50 y el 60 %, que equival aproximadament al doble de l'eficiència del motor d'explosió.
- 2) Les piles d'hidrogen són netes: ja que no existeix cap mena d'emissió, només la producció d'aigua pura. En contrast amb el motor d'explosió, la pila d'hidrogen no emet ni diòxid de sofre (que pot produir la pluja àcida), ni tampoc òxid de nitrogen (que produeix la boira fotoquímica) ni cap mena de partícula contaminant.
- 3) Les piles d'hidrogen són més silencioses: ja que no conté cap mecanisme mòbil, tot i que té un sistema de bomba i ventilador, així doncs la producció d'electricitat és bastant silenciosa. Moltes instal·lacions, com per exemple els hotels, poden substituir l'enginyeria dièsel per piles d'hidrogen com a suplement de poder energètic o bé com a reserves d'energia en cas d'apagada.
- 4) Les piles de combustible són modulars: això és perquè les piles d'hidrogen de diferents grandàries es poden col·locar juntes per aconseguir la quantitat d'energia necessària. Tal i com s'ha dit abans, la pila d'hidrogen pot produir energia en un ampli rang des d'uns pocs watts a uns quants megawatts.
- 5) Les piles d'hidrogen no són perilloses per al medi ambient: això és perquè no produeix productes tòxics, ja que l'únic producte és l'aigua (o bé aigua i diòxid de carboni en el cas de les piles de metanol).
- 6) Les piles d'hidrogen ens donen l'oportunitat de poder obtenir una gran quantitat d'energia a partir d'una font sostenible.

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 en 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 través 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 reacció és exotèrmica, mitjançant la formació d'aigua a través d'hidrogen i oxigen en estat gasos, té una entalpia de -286 kilojoules d'energia per mol d'aigua format. L'energia despresada és aprofitable per realitzar treball i equival aproximadament a -237 kilojoules per mol. Aquesta energia és en forma d'electricitat i calor.

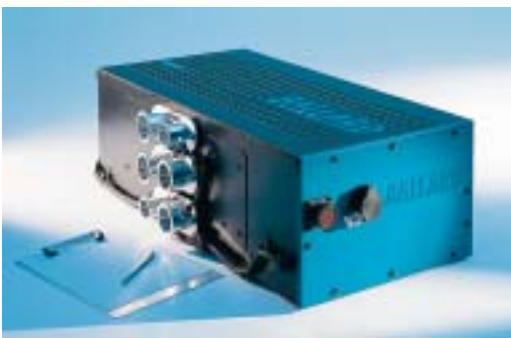
La Membrana Electrolita Polimèrica (MEP)

El material emprat com a membrana o electròlit en una pila d'hidrogen és un polímer. Les MEP són generalment produïdes

en llargues capes. La capa catalitzadora de l'elèctrode és aplicada en les dues cares, i retallada en les dimensions necessàries. Una sola capa de MEP té una gruixària aproximada de 50 a 175 micròmetres, aproximadament equivalent a la gruixària de 2 a 7 fulles de paper.

El material més emprat per elaborar les MEP es el nafió. Aquest material va ser desenvolupat el 1970 per Dupont. El nafió s'obté generant canvis al politetrafluoroetilè (PTFE), popularment conegut com a tefló, que és la base de la membrana. Aquestes modificacions corresponen a canvis en el final de la cadena de tefló, a la qual s'afegeix ió sulfúric (HSO_3). Si observéssim aquesta molècula veuríem un conjunt de cadenes allargades que tenen la propietat de ser hidrofòbiques (és a dir, que repel·len l'aigua) alhora que tenen incloses molècules de sulfonats, que són altament hidròfiles (que atrauen l'aigua).

Per tal que la membrana sigui realment eficient en el transport de ions, cal que el sulfonat de la molècula absorbeixi gran quantitat d'aigua. Gràcies a aquestes regions hidratades, els ions d'hidrogen dels grups de l'àcid sulfúric poden moure's lliurement i atorguen a la membrana la propietat de po-



Pila de combustible Mark 902 de 4a generació de Ballard Power Systems escalable de 10 kW fins a 300 kW. Un dels productes més aconseguits d'aquesta empresa.



Pila de combustible de 5,5 kW de Proton Motor Fuel Cell. Es poden apreciar els tubs per on entren l'hidrogen i l'oxigen.

der transferir els ions hidroni des d'un costat de la membrana cap a l'altra.

Pila directament amb metanol (DAFC)

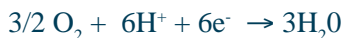
Una pila de metanol també conté una membrana de MEP. A fi de poder trencar els enllaços de metanol en la reacció de formació de diòxid de carboni, ions d'hidrogen i alliberació d'electrons s'afegeixen altres materials al platí de l'ànode. Tal com passa a la pila d'hidrogen, els electrons lliures circulen de l'ànode cap al càtode per un circuit extern i els protons són transferits a través de la membrana electrolítica. En el càtode els electrons lliures, conjuntament amb els protons o hidronis, reaccionen amb l'oxigen per formar aigua.

Les reaccions que es donen en l'interior d'una pila de metanol són:

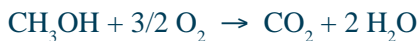
Reaccions d'oxidació:



Reaccions de reducció:



Reacció total:



Les cèl·lules de combustible d'àcid fosfòric (PAFC)

Tot i que l'experimentació amb cèl·lules de combustible amb àcids la va fer per primera vegada William Grove el 1842, aquestes cèl·lules amb àcids no es van considerar com una possibilitat energètica. Tanmateix, el 1961 els investigadors G. V. Elmore i H. A. Tanner van descriure els seus reeixits experiments amb un electrolit format en un 35 % per àcid fosfòric. La crisi energètica dels anys setanta féu que els investigadors del Laboratori nacional de Los Alamos (EUA) provessin cèl·lules amb àcid

fosfòric. S'han instal·lat en autobusos amb piles de combustible d'uns 100 kW. Tenen el problema que primer s'han d'escalfar i per això no són idònies per a vehicles privats.

Un dels inconvenients per a determinats usos però una avantatge per a altres és que les cèl·lules d'àcid fosfòric operen a temperatures d'entre 160 i 220 °C i a la temperatura més alta toleren perfectament fins a 1,5 % de concentració del monòxid de carboni que es pot produir arran dels elèctrodes. Normalment, l'hidrogen per fer funcionar la pila de combustible s'obté d'hidrocarburs i tenen una eficiència del 40 al 50 %, la qual es pot incrementar fins al 80 % quan el calor després s'empra en cogeneració. Les unitats experimentals que hi ha s'empren en finalitats comercials amb potències superiors als 200 kW. Aquestes piles de combustible són les que han tingut un èxit tecnològic més gran en aplicacions comercials i unides a cogeneració.

Com en totes les cèl·lules, els ions d'hidrogen migren a través de l'electròlit



Una de les primeres cèl·lules PEM de 5 kW dissenyades per Ballard per fer funcionar un autobús, actualment en el museu de la NASA. Comparem-la amb una de moderna (pàgina 14).

d'acid fosfòric de l'ànode cap al càtode. Els electrons generats a l'ànode viatgen a través d'un circuit extern aportant el poder elèctric al llarg d'aquest camí abans d'arribar al càtode. Un catalitzador de platí accelera les reaccions en els elèctrodes.

Cèl·lula de carbonat fos (MCFC)

El principal avantatge de les cèl·lules MCFC és que no necessiten purificar l'hidrogen, atès que a les altes temperatures que treballa, entre 580 i 660 °C, la cèl·lula és insensible a la contaminació per monòxid de

carboni. Foren estudiades ja els anys trenta a Suïssa per Emil Baur i H. Preis.

L'electròlit és una combinació de sals alcalines carbonatades de liti (Li_2CO_3) i potasi (K_2CO_3) les quals condueixen els ions carbonats (CO_3^{2-}) del càtode a l'ànode. A l'ànode l'hidrogen reacciona amb els ions i produeix aigua, CO_2 i electrons. Els electrons viatgen a través d'un circuit extern aportant electricitat al llarg del seu camí fins que no retornen al càtode. L'oxigen i el CO_2 es reciclen amb els electrons de l'ànode per formar ions CO_3^{2-} els quals reomplen l'electròlit i transfereixen corrent cap a la cèl·lula de com-

El voltatge i l'eficiència de la pila

Si la pila d'hidrogen fos totalment perfecta per transferir l'energia química en energia elèctrica, el voltatge ideal que s'obtingria a 25 °C i a 1 atmosfera de pressió seria de 1,23 volts. Atès que la pila en funcionar s'escalfa i assolix una temperatura de 80 °C, el voltatge màxim que pot arribar a produir es de 1,18 volts. Tot i així hi ha altres factors limitants que també redueixen el voltatge que pot produir la pila. La mesura del voltatge d'una pila és una bona manera de valorar la seva eficiència; com més baix és el voltatge, menor és l'eficiència elèctrica i més energia química es necessita per a la formació d'aigua i transferir el calor.

Les principals pèrdues que contribueixen a la disminució del voltatge de la pila són:

- 1) Pèrdues per activació: com a resultat de l'energia necessària per iniciar la reacció. Aquestes són conseqüència del catalitzador. El més positiu del catalitzador és la disminució de l'energia d'activació necessària per iniciar la reacció. Les formes de platí són excel·lents catalitzadors, tot i que hi ha moltes recerques amb materials millors. Un factor limitant per a la potència necessària és la velocitat a la qual tenen lloc les reaccions. La reacció del càtode (reducció de l'oxigen) és aproximadament 100 vegades més lenta que la reacció de l'ànode, aleshores és la reacció del càtode la que limita en l'obtenció de poder.
- 2) El creuament de combustible i els corrents interns: són deguts al combustible que travessa l'electròlit, des de l'ànode cap al càtode sense alliberar els electrons pel circuit extern, fet que disminueix l'eficiència de la pila.
- 3) Pèrdues per resistència: són resultat de combinar resistències de diferents components de la pila. Això inclou la resistència dels materials que componen els elèctrodes, la resistència de la membrana de l'electròlit i la resistència de les diferents interconnexions.
- 4) Pèrdues de concentració (referit com a «transport de massa»): aquestes pèrdues són resultat de la reducció de la concentració d'hidrogen i oxigen en l'elèctrode; per exemple, en fer una mesura de la nova concentració de gasos quan està immediatament disponible en el catalitzador. Amb una gran quantitat d'aigua en el càtode, particularment amb corrents alts, el catalitzador es col·lapsa i restringeix l'accés d'oxigen. Per això és important extreure aquest excés d'aigua a fi d'incrementar el transport.

bustible. Poden emprar tota mena de combustibles fòssils com a font d'hidrogen sense reformar, com ara gas natural, carbó gasificat, biogàs i gas sintètic.

L'elevada temperatura a la qual treballen les cèl·lules MCFC permet extreure l'hidrogen reformant-lo tant dins com fora. El catalitzador més idoni per a aquestes cèl·lules és el níquel, el qual és més barat que el platí. L'eficiència energètica se situa al voltant del 60 % i al 80 % amb cogeneració. N'hi ha una de demostració operativa de 2 MW a Califòrnia i una altra de 250 kW a la base aèria de Miramar a Sant Diego. El principal problema d'aquesta tecnologia és que requereix compensar la reacció del càtode injectant CO_2 i és més complex treballar amb un electròlit líquid que no pas sòlid. També cal tenir present que els carbonats fosos són molt corrosius i en dificulten la durada.

Cèl·lula de combustible d'òxid sòlid (SOFC)

Les cèl·lules de combustible d'òxid sòlid es consideren una de les tecnologies més atractives per generar electricitat a partir de combustibles fòssils. Són senzilles, molt eficients i toleren bé les impureses i, fins i tot, internament poden extreure hidrogen dels hidrocarburs. Per altra banda, el monòxid de carboni, que en altres tipus de cèl·lules és un problema, en aquestes és un combustible, fet que les fa molt idònies per emprar combustibles com ara gasoil, alcohol o carbó gasificat. Tampoc necessiten un compressor per injectar l'aire (oxigen) pels efectes de l'alta temperatura.

En canvi, tenen el desavantatge que necessiten un temps d'escalfament que a més consumeix combustible i les fa poc interessants per a aplicacions com ara els vehicles de transport, llevat que aquests funcionin contínuament.

L'electròlit és una ceràmica feta d'una barreja d'òxid de zirconi i òxid de calci que forma un reticle cristal·lí. La temperatura de treball és de 1.000 °C i això fa que els ions d'oxigen amb càrrega negativa migrin a través del reticle cristal·lí. Hi ha dos dissenys de cèl·lules SOFC: una feta amb discos ceràmics plans i una altra amb forma de tubs. Quan injectem l'hidrogen a través de l'ànode el corrent de càrregues negatives d'oxigen es mou a través de l'electròlit i oxiden el fuel. En el disseny tubular el càtode, l'electròlit i l'ànode es troben dins del tub ceràmic.

L'electròlit sòlid recobreix les dues cares del que podria ser una espècie d'electròlit porós. En aquestes altes temperatures els ions d'oxigen (de càrrega negativa) travessen la reixa cristal·lina. Quan el fuel gasificat que conté hidrogen passa a través de l'ànode, un flux de càrregues negatives dels ions d'oxigen travessa l'electròlit i oxida el fuel.



El poder energètic de les piles de combustible no ha parat de créixer. D'esquerra a dreta una mostra evolutiva dels models. El 1989 era de 100 watts/litre d'hidrogen; el 1996 ja era de 1.100 watts/litre i la primavera del 2000 va aconseguir 1.300 watts/litre.

L'eficiència és d'un 60 %, però és recomanable aprofitar el vapor i produir electricitat en una turbina per així incrementar l'eficiència fins el 80 %.

Pel fet de treballar a aquesta elevada temperatura es pot emprar qualsevol combustible fòssil gasós sense haver de reformar, però cal extreure-li el sofre. La contaminació que produeixen amb diòxid de carboni és petita. El fet que les piles SOFC, com també les MCFC, es puguin emprar en sistemes de cogeneració les fa molt atractives per a instal·lacions comercials i industrials. Les piles de ceràmica permeten dissenys molt compactes i de fàcil manteniment.

Les unitats fins ara construïdes són de

Aplicacions de les piles de combustible

Una aplicació important de les piles de combustible són els sistemes d'alimentació ininterrompuda (SAI). Aquests sistemes es perfilen com a molt idonis per a hospitals, empreses i, fins i tot, per subministrar electricitat en cas de tall del flux elèctric. Així, per exemple, una pila de combustible de 250 kW de potència pot subministrar energia a unes 50 llars. Actualment, aquestes unitats incorporen un processador del gas natural que el transforma en hidrogen i allibera diòxid de carboni. En un futur proper, les piles de combustible podran ser alimentades directament per



Autobús d'hidrogen equipat amb una cèl·lula de combustible de Proton Motor Fuel Cell. En termes d'energia 9,5 kg d'hidrogen equivalen a 25 kg de gasolina. Per emmagatzemar 25 kg de gasolina es necessita un dipòsit d'un pes de 17 kg, mentre que els 9,5 kg necessita un dipòsit de 55 kg. L'hidrogen és 1,33 vegades més eficient que la gasolina i conté 4 vegades més d'energia per volum que la gasolina.

potència superior als 100 kW amb una eficiència del 55 %. Destaca un projecte conjunt de Siemens i Westinghouse amb una planta d'1 MW amb cogeneració. Altres empreses com ara la Global Thermoelectric treballen amb una cèl·lula feta de fulls ceràmics plans que permet treballar a temperatures de menys de 800 °C. Tanmateix, aquesta tecnologia encara no és prou madura.

hidrogen sense necessitat d'un precursor fòssil. Una aplicació molt interessant són els sistemes de protecció o SAI per als servidors informàtics. En aquests moments se'n comercialitza una unitat de 1 kW. Una vegada més cal advertir que les piles de combustible han d'anar associades a equips o instal·lacions dissenyades perquè siguin el màxim d'eficients.

Aquests sistemes poden incorporar la cogeneració de calor a banda de l'electricitat. Llavors, la seva eficiència energètica pot superar el 85 %. Si comparem aquests sistemes amb les bateries convencionals hem de destacar que les piles de combustible contenen per unitat de volum una densitat energètica de dues vegades i mitja d'una pila de ió liti o fins tres vegades la d'una bateria convencional de plom-àcid. Si aquesta relació la comparem amb la densitat d'energia respecte al pes, resulta que les piles de combustible pesen 6 vegades menys que una bateria de plom-àcid. En altres paraules, que duren molt més que una bateria convencional. Per altra banda, una pila de combustible subministra energia de manera ininterrompuda mentre se li aporta hidrogen.

L'hidrogen en els mitjans de transport

Les piles de combustible són una alternativa segura, simple, silenciosa i no contaminant alhora que econòmica. Per això es plantegen com una alternativa viable per substituir els motors de combustió interna dels motors de gasolina i dièsel. S'ha comprovat que les piles de combustible actuals aplicades als vehicles domèstics poden tenir una durada per recórrer més de 400.000 km o l'equivalent a unes 10.000 hores o fins un milió de quilòmetres o 25.000 hores en autobusos, camions, vaixells i locomotores. Així doncs, quant a la durada, les piles de combustible són competitives i no ofereixen cap problema. Tanmateix, aquestes piles

necessiten convertir l'energia elèctrica en energia mecànica, mentre que en els motors de combustió aquesta conversió és directa. En contrapartida no necessiten manteniment, són silencioses, no emeten pràcticament contaminants i tenen una alta eficiència, de fins al 35 %, mentre que la dels motors de combustió interna no supera el 25 %.

El Programa de vehicles d'emissió zero promogut per l'Estat de Califòrnia va establir que a partir de 2003 un 10 % dels automòbils fossin d'emissió zero (ZEV). Els vehicles equipats amb piles de combustible d'hidrogen compleixen aquesta condició. En el cas dels cotxes, per exemple, companyies com Daimler-Chrysler amb el model Nekar o Honda amb el FCX amb pila d'hidrogen no emeten els òxids de nitrogen, el diòxid de sofre, el monòxid de carboni o les partícules típiques dels models amb motor de combustió interna. En aquests moments hi ha diversos models d'autobusos equipats amb piles de combustible PEM que ja s'han començat a introduir en diverses ciutats europees.



Vehicle d'hidrogen de la casa Honda lliurat a principis del 2003 al govern californià per demostrar la viabilitat d'aquesta tecnologia.

Equipat amb una pila de combustible Ballard de 78 kW, una autonomia de 355 km i un dipòsit de 3,75 kg d'hidrogen a 350 bars.

Infraestructures per a l'hidrogen

Una de les claus per al desenvolupament de l'economia de l'hidrogen és la disponibilitat d'infraestructures per a l'emmagatzematge, transport i distribució. Actualment, pràcticament a tot el planeta podem fer arribar combustibles fòssils ja sigui en forma líquida com gasosa. Així doncs, el repte és si volem invertir per renovar aquestes infraestructures del petroli dins d'una economia obsoleta (o que en tot cas té una data de caducitat) per les de l'hidrogen, les quals representen una nova manera d'entendre la disponibilitat energètica. La tecnologia actual ens posa a l'abast poder implantar l'hidrogen com a vector energètic. Només cal comprendre que potser no hi haurà un futur saludable si no és amb fonts d'energia netes.

Sistemes d'emmagatzematge

L'hidrogen es pot emmagatzemar en estat líquid i gasós i també inclòs en determinats metalls en la forma química d'hidrur.

Hidrogen comprimit o pressuritzat (CL2)

Parlem de d'hidrogen pressuritzat quan s'emmagatzema a pressions més grans de les



Cèl·lula de combustible de 250 kWh alimentada amb gas natural en fase experimental instal·lada a Berlín, de la Ballard Power Systems. Una cèl·lula consumeix 0,025 litres d'H₂ per kWh generat.

condicions normals. Avui, una de les formes més habituals és amb tancs fets de fibra de carboni envoltant una capa d'alumini per suportar pressions de 700 bars (l'aire comprimit s'emmagatzema a pressions de 300 bars). Actualment, hi ha hidrogeneres que poden subministrar a pressions d'entre 250 o 400 bars i recarregar els dipòsits d'un vehicle en menys de 4 minuts. Quan cal emmagatzemar grans quantitats d'hidrogen es fa a pressions més baixes (uns 50 bars) en cavitats subterrànies. Aquest és el sistema més econòmic per a grans quantitats de milions de Nm³ (acrònim de metres cúbics normals, és a dir a temperatura de 0 °C i una pressió d'1 atmosfera)

Hidrogen líquid

L'hidrogen líquid és la forma que presenta una densitat energètica més alta en proporció al volum, unes 800 vegades més dens que en estat gasós. La líquefacció es produeix a -235 °C. És un sistema que requereix una important despesa energètica. Per això s'ha de conservar en els anomenats criotancs. El criotanc és l'artefacte que sembla més interessant per a les aplicacions mòbils, atès que és el que necessita menys espai. Tanmateix, té el problema que presenta pèrdues per evaporació de l'ordre de 0,4 % en els tancs aïllats al buit i de l'1 al 2 % en els tancs més grans. Un autobús amb una capacitat d'energia equivalent a uns 50 litres de gasolina o l'equivalent a 450 kWh necessita només tres tancs de 190 litres. Per recarregar els dipòsits amb hidrogen líquid no es necessita més de 15 minuts. Aquest sistema és el que pot tenir més èxit tot i l'elevat cost de manteniment dels criotancs. El prototip de vehicle de BMW 745h va equipat amb un motor de combustió interna que crema l'hidrogen líquid. El resultat és un vehicle que amb hidrogen pot recórrer uns 300 km i

amb gasolina 650 km i pot cremar tant gasolina com hidrogen.

Emmagatzematge en hidrurs metàl·lics

L'hidrogen té la propietat de poder reaccionar amb diferents metalls o compostos intermetàl·lics formant el que s'anomenen hidrurs. En aquesta forma química pot emmagatzemar més hidrogen per unitat de volum que l'hidrogen líquid. Atès que en condicions idònies de temperatura i pressió aquesta reacció és reversible, una determinada massa metàl·lica pot ser carregada i descarregada un nombre pràcticament il·limitat de vegades i, per tant, es pot emprar com a dipòsit d'emmagatzematge sòlid de l'hidrogen.

Aquesta forma d'emmagatzematge té l'avantatge que es pot fer a baixes pressions (menors de 1,01 atmosferes) i que és un sistema molt segur. En cas de produir-se una pèrdua sobtada d'oxigen, el sistema reacciona inhibint l'alliberament addicional de gas. Aquesta forma de conservar l'hidrogen requereix un material absorbent que pot ser el 7 % del pes de l'hidrogen total. En general, es tracta d'un sistema pesat i que no és interessant per a aplicacions mòbils. Es calcula que per disposar d'uns 30 Nm³ (1 Nm³

equivale a 0,34 litres de gasolina, és a dir, l'equivalent a 10 litres de gasolina o 90 kWh) el pes pot ser d'entre 230 i 460 kg i volums de 60 a 90 litres. Un sistema optimitzat només permet un emmagatzematge del voltant del 1,8 % del pes total.

L'emmagatzematge d'hidrogen en forma d'hidrurs és especialment útil i convenient en sistemes energètics aïllats i on l'energia elèctrica es pot generar amb el vent, el sol o petites centrals hidroelèctriques. Les piles d'hidrurs són un sistema típic dels submarins.

Els nanotubs de carboni

Avui, una de les tecnologies més prometedores és la dels nanotubs de carboni i hom pensa que podria ser la forma d'emmagatzematge d'hidrogen en el futur. El sistema, encara en proves, es basa en el fet que es pot emmagatzemar l'hidrogen en tubs microscòpics, en nanotubs de carboni de poc més d'un nanòmetre de diàmetre (0,000001 mil·límetres) fets d'estructures de grafit. Aquest sistema pot permetre emmagatzemar densitats del doble que les que actualment s'obtenen en tancs amb hidrogen líquid.

Sistemes de transport

Actualment, hi ha tres tecnologies per fer arribar l'hidrogen a l'usuari. Al món ja hi ha diverses infraestructures preparades per distribuir l'hidrogen ja sigui com a líquid o com a gas comprimit.

El transport de l'hidrogen líquid (LH₂)

Aquest sistema és el més emprat per a petites quantitats. S'empren camions amb tancs de 5.000 litres. El principal problema d'aquest tipus de transport és que es rendible només en distàncies mitjanes a causa de l'evaporació que sofreix l'hidrogen líquid.



Sistema SAI per a ordinadors d'1 kW alimentat amb bombones d'hidrogen i comercialitzada amb el nom de AIRGEN.

Transport d'hidrogen comprimit (CGH₂)

L'hidrogen comprimit es transporta en camions amb tancs a una pressió de 200 bars amb capacitats de 2.400 a 3.600 Nm³. Tanmateix, mentre que amb un camió es poden transportar fins a 30.000 kg de gasolina (l'equivalent a 399 MWh) el màxim que hi cap d'hidrogen són 3.600 kg (l'equivalent a 120 MWh).

Transport a través de gasoductes

També es pot transportar a través de gasoductes preparats adientment. Atès que l'hidrogen té una densitat menor que el gas natural, es pot bombejar 3 vegades més flux que si fos gas natural. A Alemanya ja n'hi ha 208 km i 400 km entre França i Bèlgica.

Seguretat i informació

Un dels tòpics més estesos és la perillositat de l'hidrogen i se cita l'explosió el 1937 del globus zepelin Hindenburg, que emprava hidrogen com a complement del fuel, en aterrar a Lakehurst (EUA). Tanmateix, se sap que la causa de l'incendi en el qual van morir 36 persones no fou l'explosió de l'hidrogen sinó un incendi de la tela del globus per un guspira d'electricitat estàtica. A finals dels anys vint la Zeppelin Company va proposar barrejar 1 m³ d'hidrogen per cada kilo de fuel emprat per produir més energia i, per tant, atorgar més velocitat a les seves aeronaus i així reduir la travessia atlàntica a 2,5 dies. Tanmateix, aquest accident fou ridícul si ho comparem amb el xoc i incendi dels dos Boeing 747 a l'aeroport de Los Rodeos (Tenerife) el 27 de març de 1977 que va causar la mort de 583 passatgers. Curiosament, l'accident del Hindenburg va traumatitzar la societat de l'època sobre l'ús de l'hidrogen (sense ser-ne el causant, tal com han provat



Comparació entre un incendi en un cotxe d'hidrogen a l'esquerra i un de gasolina a la dreta. Un minut després de l'inici en el de l'esquerra l'hidrogen surt cremant i en el de la dreta la gasolina continua cremant. Als 100 segons en el cotxe d'hidrogen el dipòsit és buit i no s'ha cremat, mentre el de gasolina s'incinera.

investigacions actuals), cosa que no ha passat amb el petroli, tot i les tragèdies que ha causat, algunes de dantesques com l'esmentat accident a l'aeroport de Tenerife.

Actualment, tenim prou coneixements sobre el comportament d'aquest gas com perquè es pugui manipular, emmagatzemar i transportar amb absoluta seguretat. En el pitjor dels casos un accident amb un cotxe amb hidrogen només causaria un alliberament inofensiu d'hidrogen a l'atmosfera.

L'economia de l'hidrogen¹

Per primera vegada a la història de la humanitat tenim al nostre abast una forma d'energia omnipresent. El temps que tardem a assolir aquest nou estadi socioeconòmic basat en una font d'energia democràtica dependrà de la fermesa per emancipar-nos dels combustibles fòssils i d'abandonar la creença que el petroli barat és encara abundant. L'hidrogen pot arribar a ser tan barat com ho són ara els telèfons mòbils o els ordinadors personals. Tenim una oportunitat única per donar un tomb radical a la civilització humana.

¹ Les idees d'aquest apartat s'inspiren en els capítols 8è i 9è del llibre de Jeremy Riffkin *La economia del hidrógeno*.

Generació distribuïda

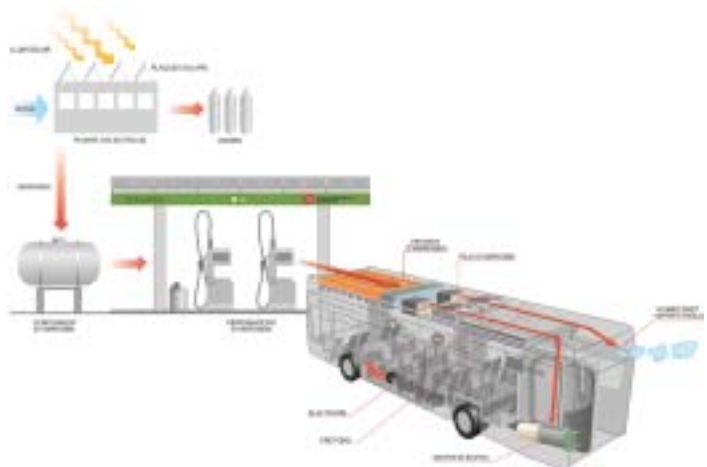
L'expressió generació distribuïda fa referència a l'existència d'un conjunt de petites instal·lacions generadores d'electricitat situades prop de l'usuari final i que poden funcionar de manera autònoma i alimentar la xarxa. Actualment, la tecnologia emprada en la generació distribuïda són les microturbines de gas. Aquest sistema de lliurar l'electricitat no és gaire apreciat per les grans companyies que continuen ancorades en el model de grans centrals energètiques allunyades dels grans nuclis consumidors i transportades per una àmplia xarxa d'alta tensió. Aquest sistema centralitzat té nombroses pèrdues en el transport i manté l'oligarquia de les grans companyies.

Ara bé, la dependència de la indústria i de la societat en general ha començat a fer veure que l'única fórmula per fer front als talls elèctrics és integrar centres productors dins la xarxa i propers al consumidor. Les piles de combustible es perfilen com la tecnologia més idònia a mitjà termini. La millora de la qualitat del subministrament elèctric té cada vegada un mercat més gran. La liberalització del mercat elèctric el gener del 2003 podria accelerar la generació distribuïda. Les energies renovables i l'hidrogen hi poden tenir un paper important. La cogeneració, és a dir, aprofitar la producció d'energia en forma de calor per fabricar electricitat fa augmentar enormement l'eficiència dels sistemes energètics. Així, mentre una planta de cycle combinat pot assolir el 50 % d'eficiència, amb cogeneració podria arribar al

80 %. Només cal instal·lar-les prop de sectors industrials i població que necessiti calor en els seus processos. La planta elèctrica de cycle combinat prevista a la desembocadura del Besòs podria ser molt útil per subministrar aigua calenta a l'àrea metropolitana i a les indústries del sector. Malauradament, es malversaran milions de kWh d'energia aprofitable perquè el disseny no inclou la cogeneració.

La xarxa energètica de l'hidrogen

Les veritables revolucions sempre van acompanyades de tecnologies de la comunicació. L'era industrial fou possible gràcies a l'existència de la impremta. Actualment, Internet i la World Wide Web podria ser el vehicle per empènyer la generació distribuïda i les piles d'hidrogen a una revolució en el sistema energètic mundial fonamentat en l'economia fòssil i nuclear. La connexió de petites centrals basades en piles de combustible i energia solar en habitatges, oficines o fàbriques podria permetre crear una xarxa de producció suficient per alimentar les necessitats d'una ciutat o una àrea metropo-



L'estació de recàrrega solar dels autobusos d'hidrogen de Barcelona és un bon exemple de les possibilitats de les energies renovables.



Transport d'hidrogen líquid criogènic. Aquest sistema és complex i té pèrdues, de moment inevitables. Tanc destinat als cohets Arienne.

litana. L'experiència d'Internet funcionant amb milions de servidors interconnectats podria ser un precedent per aplicar aquesta filosofia al sistema energètic mundial. En el desenvolupament d'Internet, de seguida es va demostrar que era molt més costós mantenir superordinadors que no pas treballar amb una bateria de petits ordinadors, econòmics i fàcils de mantenir. Molts

ordinadors junts feien la feina amb més precisió i eficiència que no pas els macroordinadors. Així, doncs, l'experiència d'Internet té un notable paral·lelisme entre les megaplantes elèctriques actuals i les possibilitats que dibuixen les piles de combustible. En el futur milers de piles de combustible podrien subministrar la mateixa electricitat que una planta nuclear de 1.000 MW.

Cal establir noves regles en l'ús i l'accés a la xarxa elèctrica. Ens podem aprofitar del desenvolupament de la informàtica com a eina de comunicació i gestió. Malauradament, l'experiència de la cogeneració, que es pot considerar una experiència de generació distribuïda, ha estat capada amb contundència pels grans monopolis energètics. Impedir la rendibilitat de la cogeneració és una bajanada si tenim en compte la inestabilitat de l'actual sistema basat en una xarxa tan complexa com la d'alta tensió, plena de pèrdues i amb notable impacte de contaminació electromagnètica.

Un altre factor que podria accelerar la

Reflexions energètiques

La demanda mitjana de productes càrnics d'una família de 4 membres propicia el consum de 984 litres de combustibles fòssils que quan es cremen alliberen 2,25 tones addicionals de CO_2 , la mateixa quantitat que un cotxe durant 6 mesos de funcionament normal.

Un barril de petroli (158,9 litres) permet produir gasolina per conduir uns 300 km amb un cotxe de mida mitjana, gasoil per recórrer 64 km amb un camió de gran tonatge ple i lubricant per elaborar només 1 litre d'oli sintètic de motor.

El 1986 es necessitaven 16 g de platí per quilowatt produït, avui només se'n necessiten només 1,6 g. La producció mundial de platí és d'unes 160 tones (el 80 % extretes de Sudàfrica). Quan platí es necessitaria si els 1.000 kWh/habitant/any de consum en electricitat dels Catalans es fessin amb piles de combustible?

L'eficiència de la cèl·lula de combustible

La membrana d'intercanvi protònic és d'un polímer, el nafió semblant al Goretex emprat per fabricar roba de muntanya i esportiva. El voltatge teòric que aportaria seria de 1,23 volts (que és el voltatge mínim per descompondre l'aigua en l'electròlisi). Actualment, el màxim corrent per superfície és de 2 ampers/cm². A la pràctica per cada cèl·lula s'obtenen entre 0,6 i 0,9 volts de corrent continu. Per obtenir voltatges més grans cal connectar moltes cèl·lules. Atès que l'energia química es converteix directament en electricitat, l'eficiència d'una cèl·lula de combustible és d'un 50 %, mentre que un motor de combustió interna, el qual està sotmès al principi de Carnot, no supera el 30 % i normalment es queda entre el 15 % i el 20 %.

generació distribuïda amb hidrogen és la introducció del cotxe amb piles de combustible. Al món hi ha 750 milions de vehicles a les carreteres que consumeixen el 20 % de l'energia primària global i, lògicament, són responsables de prop del 20 % de les emissions de diòxid de carboni a l'atmosfera planetària. Les piles d'hidrogen no produeixen gasos tòxics i, atès que un vehicle es passa prop del 90 % del temps aparcad, en realitat tenim una central elèctrica sobre rodes amb una capacitat de generació de 20 kW.

La transició vers els cotxes amb piles de combustible ens posa a l'abast un ingent potencial de producció energètica ja que el podem connectar a la xarxa elèctrica de casa o de l'oficina mentre el vehicle està aturat. Es calcula que crear la infraestructura necessària per produir i distribuir l'hidrogen en grans quantitats pot tenir un cost superior als 100.000 milions de dòlars. Si fa no fa el preu estimat d'una guerra com ara la d'envair l'Iraq.

Però, hi ha altres alternatives per propi-

ciar una transició vers l'hidrogen. Una possibilitat és que les piles de combustible no s'implantin primer massivament en els cotxes sinó als habitatges i oficines per produir hidrogen en moments de consum baix. Sigui com sigui, tenim a les nostres mans les eines i els conceptes per fer una gran revolució, com ho fou la introducció del vapor el segle XIX. L'avantatge de l'hidrogen és que no comporta el risc ambiental del carbó o la resta dels combustibles fòssils.

Quan la humanitat s'ho proposa és capaç de batre els seus propis rècords. Adonem-nos que l'economia d'Internet s'ha creat en menys de deu anys. És evident que l'experiència de la World Wide Web ha demostrat que democratitzar la informació no està exempta de perills i que els grans trusts fan el possible per segar la llibertat dels canals d'informació. Una prova d'això és la desaparició legal de l'intercanviador de música Napster. Però, en aquesta batalla, també hi ha l'èxit creixent del sistema operatiu de software lliure Linux el qual demostra que

Barcelona aposta per l'hidrogen

La ciutat de Barcelona participa juntament amb diverses ciutats europees del projecte CUTE (Transports Urbans Nets per a Europa) l'objectiu del qual és el desenvolupament d'autobusos alimentats amb hidrogen. Per això, incorporarà a la tardor del 2003 tres autobusos d'hidrogen a la seva flota per fer les proves oportunes i descobrir l'opinió de la ciutadania. Tanmateix, aquesta aposta té com a objectiu final aconseguir un vehicle de transport no contaminant, silenciós i d'energia neta.

Per al subministra d'hidrogen Transports Metropolitans de Barcelona (TMB) disposarà d'una planta fotovoltaica amb la qual generarà per hidròlisi de l'aigua l'hidrogen per a les piles de combustible que alimentaran els autobusos d'hidrogen. Aquesta serà la primera estació de producció d'hidrogen a Europa que utilitzarà l'energia fotovoltaica per al seu funcionament, la qual compta amb l'experiència internacional de l'empresa BP Solar.

L'autonomia dels autobusos fabricats per Mercedes Benz serà d'entre 200 i 250 km amb una velocitat màxima de 80 km/hora i una capacitat per a 70 passatgers. L'autobús amb pila de combustible que alimenta un motor elèctric és una alternativa als vehicles elèctrics alimentats per bateries convencionals perquè pesen menys i tenen una major autonomia.

L'aposta de Barcelona té un cost de 3,75 milions d'euros per incorporar 3 vehicles d'hidrogen a la seva flota. Alhora, juntament amb Madrid, Amsterdam, Estocolm, Hamburg, Stuttgart, Londres, Luxemburg, Port i Reykjavic es convertirà en una ciutat de referència per a la tecnologia de l'hidrogen.

un altre món es possible. En tots els canvis hi ha núvols foscos i el pas cap a l'economia de l'hidrogen no en serà una excepció. Tanmateix, cal valorar l'experiència de les comunitats civils com ara les CSO (Civil Society Organizations) capaces d'emprar Internet per unir interessos de milions de persones (amb èxits tant notables com ara abolir l'ús de les mines antipersona, defensar els drets de les dones o protegir el medi ambient). Internet és l'escenari on s'ha democratitzat la informació. L'hidrogen ha de ser el vector per democratitzar l'ús racional de l'energia.

Ara només cal prendre consciència, apostar per la tecnologia de les piles de combustible i organitzar-se col·lectivament per defensar el dret a generar electricitat de forma distribuïda. Potser tots aquests conceptes ens semblen utòpics. L'economia de l'hidrogen i la implantació d'una xarxa energètica descentralitzada i democràtica pot servir per redistribuir els assentaments humans adaptant-los a les bioregions i així afavorir una convivència més harmònica amb l'entorn. "Entrellaçar les comunitats humanes amb les biocomunitats genera un nou i profund sentit de seguretat, inseparable de la salut i el benestar de la Terra. La creació d'un arquitectura econòmica i social que constitueixi un microcosmos de la pròpia filosofia de la Terra obre un nou món ple de possibilitats de natura afirmativa i regeneradora per a la nostra espècie."

L'impacte ambiental de l'hidrogen

En el futur, si l'economia de l'hidrogen es desenvolupa a partir de l'energia solar les emissions d'aquest gas i del vapor d'aigua no alteraran els cicles i balanços naturals. Aquesta és el principal avantatge d'apostar per la tecnologia de l'hidrogen. Tanmateix, cal considerar les alteracions que es podrien produir al cicle de l'aigua.

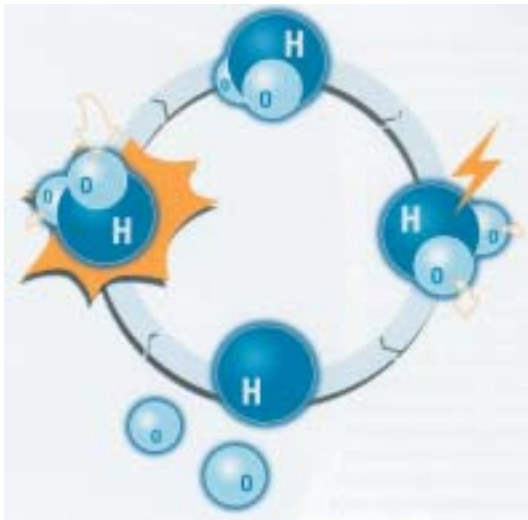
Segons els científics, les emissions de vapor d'aigua i d'hidrogen poden ser més petites que les que actualment causen els combustibles fòssils i l'energia nuclear, atès que poden representar només un 0,005 % del total del cicle de l'aigua. Ara bé, aquests resultats no inclouen les aplicacions que es puguin fer de la combustió d'hidrogen a l'estratosfera per part d'avions i la indústria espacial. La baixa concentració de vapor d'aigua a nivells estratosfèrics (a uns 11 km, un espai aeri molt idoni per consumir poc combustible i tenir un vol tranquil) en cas d'emprar l'hidrogen en l'aviació podria causar increments de la densitat de radiació solar de fins 0,75 W/m². Les emissions futures quan s'assoleixin nivells de pèrdues del 2 al 3 % serien de la mateixa magnitud que les de la combustió incompleta d'hidrocarburs.



L'hidrogen estel·lar fa de reservori per formar nous estels. Aquesta fotografia de la nebulosa Àliga (M16) a 7.000 anys llum fotografiada pel telescopi espacial Hubble ens mostra que l'univers té en l'hidrogen la seva principal font d'energia. Un bona imatge per inspirar el futur de l'economia de l'hidrogen en la civilització humana.

Si volem contribuir a fer possible la revolució de l'economia de l'hidrogen ens cal prendre consciència de les possibilitats que ofereix aquest vector d'energia. Experimentar amb l'hidrogen des de l'escola és essencial. Les piles de combustible són, avui per avui, la millor tecnologia per proveir el planeta d'una font d'energia no contaminant i que pot contribuir a democratitzar la societat del segle XXI.

Fem hidrogen



Electròlisi

Malgrat que l'hidrogen és l'element que forma un 75 % de l'univers no acostuma a estar en estat pur i lliure. Una de les substàncies bàsiques on es troba l'hidrogen és l'aigua. Així que el primer pas per descobrir aquest gas és provocar que es desprengui d'aquest líquid i s'alliberi en forma de gas. El procés que ho fa possible s'anomena electròlisi i fou descobert el 1796 pel científic anglès Cavendish. Per això, el primer pas per endinsar-nos en el coneixement de les possibilitats de l'hidrogen és tenir l'evidència d'aquest element.

Per fer aquest experiment necessitem: un recipient de vidre, si pot ser un pot de laboratori de 400 a 1.000 ml ple d'aigua destil·lada, una mica de cable elèctric, dues barretes de metall, si pot ser de coure, i una pila plana de 6 volts.

La separació de l'oxigen es produeix quan submergim les dues barretes de metall al

recipient d'aigua i cada una d'elles les connectem als pols positiu i negatiu respectivament de la pila. Així que comença a passar l'electricitat podem observar com es formen bombolletes al voltant de la barreta. En la barreta que està connectada al pol negatiu de la pila (que anomenarem càtode) les bombolletes que s'hi fan són d'hidrogen i en la barreta connectada al pol positiu de la pila (l'ànode) les bombolletes són d'oxigen. Hi ha aparells de laboratori en els quals podríem recollir aquestes bombolles de gas.

L'electròlisi és l'experiment contrari del que passa en una cèl·lula de combustible on es produeix la reacció inversa, la qual consisteix a injectar hidrogen gas que s'uneix a l'oxigen per formar aigua i desprendre energia. Energia que podem aprofitar en forma d'electricitat. Al nostre experiment d'electròlisi li podem afegir entre el pol positiu de la pila i l'ànode una bombeta. Si llavors afegim sal de cuina a l'aigua del recipient descobrirem que la bombeta s'encén. La sal dissolta es una barreja de ions positius (de sodi) i negatius (de clor) que fan

de transport per a altres càrregues. Aquest paper és el que definim com el de l'electròlit. La sal abans de disoldre's en l'aigua no pot transferir càrregues positives ni negatives perquè es tracta d'una substància cristal·lina molt estable. Quan la sal es dissol pot transferir electrons fàcilment i aquests flueixen, raó per la qual la bombeta s'il·lumina. En una cèl·lula de combustible es produeix electricitat ionitzant l'hidrogen i l'oxigen. L'estructura atòmica de l'hidrogen i l'oxigen canvia per causa del procés de ionització, és a dir, quan es disposa d'una substància que allibera càrregues positives i negatives, que és el que s'esdevé en una cèl·lula de combustible, és a dir, que es crea electricitat a través d'un medi químic.

De fet, aquest és el procés que té lloc a l'interior d'una pila seca. En una cèl·lula de combustible, a diferència d'una pila seca, es produeix electricitat mentre subministrem la substància que porta electrons. En canvi, en una pila, seca la reacció química que produeix electricitat es va esgotant a mesura que li extraïem els electrons perquè no hi ha

Vocabulari bàsic

Ànode: pol negatiu d'un elèctrode.

Càtode: pol positiu d'un elèctrode.

Cèl·lula de combustible: font de generació d'energia per mitjà electroquímic.

Cogeneració: producció d'electricitat aprofitant el vapor d'aigua que es necessita per a determinats processos industrials.

Corrent altern: electricitat en la qual la intensitat i la tensió varien de forma periòdica.

Corrent continu: electricitat en la qual la intensitat i la tensió es mantenen constants.

Electricitat: flux d'electrons en un circuit, generalment amb un conductor metàl·lic.

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.

Electroquímic: sistema de conversió de l'energia química en energia elèctrica.

Hidrogen: element químic que conté un protó i un electró.

Ionització: procés que fa perdre o guanyar electrons per formar ions positius o negatius.

Membrana: substància que permet el pas d'una substància i n'impedeix el pas d'altres.

Oxidació: procés químic que aporta electrons.

Pila de combustible: conjunt de cèl·lules de combustible unides entre elles per incrementar el voltatge que es genera.

Polímer: substància sintètica o natural composta de molècules simples repetides i enllaçades entre elles.

Reducció: procés químic que produeix absorció d'electrons.

Voltatge: mesura del potencial elèctric en un circuit.

la possibilitat d'afegir un element que aportí electrons. En una cèl·lula de combustible l'electròlit permet viatjar als electrons mentre els hi subministrem. Els electrons els aporta l'hidrogen gas quan entra en contacte amb l'electròlit.

Un altra experiència que podem extreure de l'experiment de l'electròlisi i la ionització és substituir la barreta d'un dels elèctrodes per una d'un metall diferent. Per exemple, mantenim el coure al càtode i col·loquem una barreta de níquel a l'ànode. Quan l'aigua és salada i fem circular l'electricitat de la pila observarem que aquesta viatja de l'ànode al càtode. El resultat és que podrem observar una deposició de pigues metàl·liques que no són res més que ions de níquel que amb gran quantitat d'energia recobriria tot el coure. En la indústria aquest és el procés de cromar els metalls. Comprendre bé aquests processos des de l'experimentació contribueix a comprendre millor el funcionament de la pila de combustible.

Una visita obligada

A la cotxera d'autobusos de la Zona Franca de Transports Metropolitans de Barcelona s'hi instal·larà una estació generadora d'hidrogen mitjançant hidròlisi de l'aigua. L'energia per generar l'hidrogen la sub-



ministrarà una instal·lació de plaques solars fotovoltaïques. Aquesta estació d'hidrogen constitueix un recurs pedagògic per comprendre a la pràctica el potencial de l'economia de l'hidrogen. El telèfon de Relacions Externes de TMB és el 932 987 000.

Kits pedagògics d'hidrogen

La Fundació Terra comparteix la visió que el futur de l'energia de la humanitat no pot ser brut com el que ha ens ha aportat durant més d'un segle el petroli. La clau del futur passa per dos nous elements que són nets, com és el silici i l'hidrogen. El silici cristal·lí és la base de la captació de l'energia solar a través de l'efecte fotovoltaic. L'hidrogen és el millor vector energètic per generar electricitat. Cal experimentar el poder d'aquesta combinació per entusiasmar-se amb l'energia del futur. Només si toquem el cor de la mainada amb l'hidrogen, amb experiments, jugant, podrem pensar en un futur menys negre que el que tenim essent depenents dels combustibles fòssils. Per això, creiem fonamental la difusió dels kits pedagògics existents al mercat. Els kits d'hidrogen són com els «mecanos» amb els que jugàvem la canalla dels seixanta. Per això, des de la botiga virtual Biohabitat de la Fundació Terra (telèfon 936 011 636) facilitem l'obtenció dels kits pedagògics d'hidrogen més interessants.

Construction 30 d'EiTech

Aquesta maleta és un «mecano» que permet construir 3 ginys fets de peces metàl·liques. Un ciclista, una nòria i un joc d'engranatges que es belluguen per la força de l'hidrogen. La cèl·lula de combustible s'alimenta d'una petita bombona de 0,045 litres d'hidrogen a una pressió de 0,5 bars que permet obtenir 930 milivolts en una

cèl·lula de combustible que proporciona de 0,4 a 1 volt.

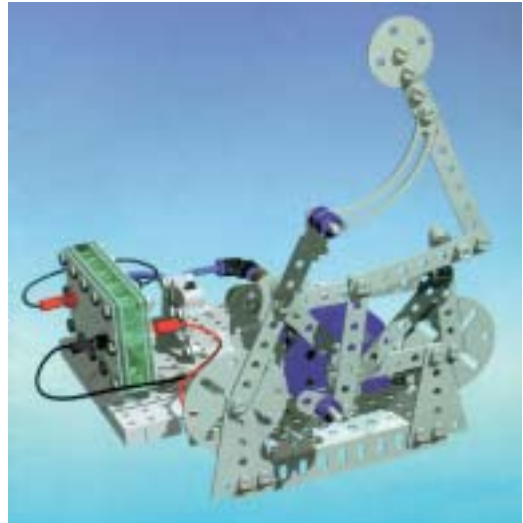
El principal interès d'aquesta maleta és que aporta la necessitat d'un muntatge previ que obliga un cert enginyer previ a la demostració del potencial de l'hidrogen com a combustible. La simplicitat de totes les peces fa molt més comprensible la senzillesa de la pila de combustible. Al capdavant una cèl·lula de combustible de membrana protònica PEM no és altra cosa que un polímer encapsulat entre un ànode i un càtode. En aquest sentit, no som davant d'un recurs vistós, però en contrapartida il·lustra les peces essencials d'una central elèctrica amb hidrogen. L'únic desavantatge és que la bombona d'hidrogen no es pugui recarregar amb el propi kit.

El cotxe d'hidrogen de KOSMOS

El futur ens pot dibuixar un món en el qual vehicles, màquines i altres aparells s'alimentin amb cèl·lules de combustible d'hidrogen. El kit d'experimentació de KOSMOS ens avança el futur i el converteix en una eina per aprendre. Un recurs pedagògic per tastar el món sense contaminació que aporta la tecnologia de l'hidrogen solar. Una gran



Presentació del kit del cotxe per experimentar amb l'hidrogen solar de KOSMOS.

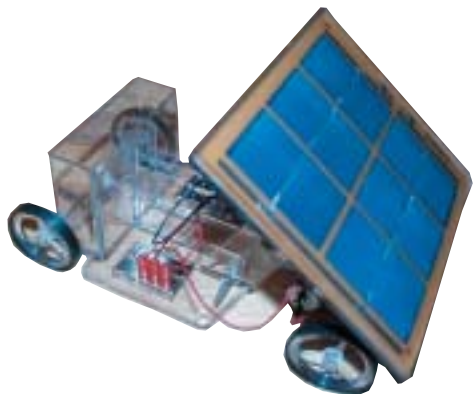


Kit d'Eitech de la cèl·lula de combustible amb la bombona d'hidrogen que acciona el motor elèctric que mou el ciclista mecànic.

oportunitat resumida en un cotxe de metacrilat equipat amb una cèl·lula de combustible reversible. És a dir, una pila que pot generar l'electricitat necessària per descompondre l'aigua i obtenir hidrogen mercès a l'energia feta per un panell solar fotovoltaic. L'hidrogen s'emmagatzema en una bombona que quan no tenim llum del Sol podem dirigir cap a la cèl·lula de combustible i generar novament electricitat per fer funcionar el motor elèctric que mou el cotxe.

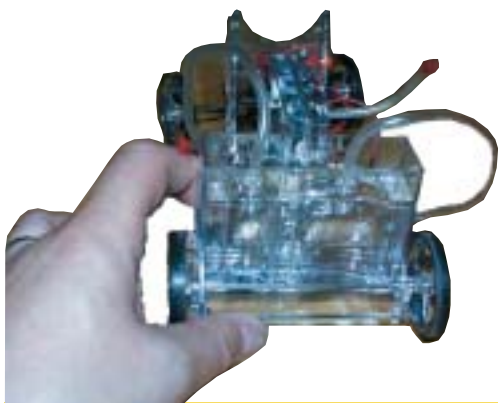


Detall de la cèl·lula de combustible del cotxe amb el dipòsit d'aigua i placa fotovoltaica.



Detall de la placa fotovoltaica amb la qual es genera l'electricitat que serveix per recarregar el tanc d'hidrogen del cotxe, amb el qual, un cop ple, a través de la cèl·lula de combustible es fa girar el motor elèctric que el mou.

Es tracta d'un dels kits pedagògics més enginyosos que mai s'ha creat per refermar el naixement de l'era de l'hidrogen. Els seus autors el Dr. Detlef Bahnemann (1953), Christopher Berge (1972) i Francisco Pujiula-Krüger (1961) amb una cèl·lula de combustible fabricada per NOVARS i el desenvolupament dels laboratoris de KOSMOS han aconseguit una joguina pedagògica que no necessita cap altra energia que la llum del Sol per funcionar.



Detall del dipòsit d'aigua amb els tubs que recullen l'hidrogen i l'oxigen que serveixen per fer produir electricitat a la cèl·lula de combustible.

El kit ens proposa 30 experiments senzills per prendre el pols al potencial de l'hidrogen com a vector energètic. Per exemple, uns 10 minuts de llum solar permeten fabricar hidrogen per fer córrer el vehicle uns 20 minuts.

Ja hem comentat en aquesta monografia que la gran lluita per implantar aquesta font d'energia neta rau en el fet que l'hidrogen present a l'aigua s'extregui amb energies renovables. El kit de KOSMOS és doncs el paradigma d'aquesta aposta que ha de permetre a la humanitat sortir de l'era fosca del petroli. Una etapa que tot i haver permès un enorme progrés s'ha cobrat un bon tribut amb forma de contaminació, alteracions globals i conflictes sociopolítics que han deixat milions de víctimes arreu del planeta.

Creiem que aquests kits d'hidrogen es converteixen en recursos molt idonis perquè a l'escola es puguin debatre molts dels aspectes que hem apuntat.

- Quant CO_2 podríem deixar d'alliberar per cada cotxe amb motor de combustió interna retiresim de les carreteres i carrers?

- Dels 1000 kWh/m² que rebem del Sol les plaques fotovoltaïques amb una eficiència d'entre el 10% i el 20 % poden subministrar en uns 50 m² de panells fotovoltaïcs el consum elèctric mitjà d'una família (uns 4.500 kWh/any). Tenim prou teulada per captar l'energia solar i ser productors d'electricitat a casa?; l'energia solar no consumida de dia es podria emmagatzemar amb hidrogen i produir electricitat de nit; no podríem estalviar més energia a casa?

- La producció d'hidrogen a partir de residus pot resultar una solució?

- Podem imaginar un futur amb l'hidrogen com a motor energètic per a una humanitat més solidària i respectuosa amb l'entorn? La tecnologia ens posa la llavor per enamorar-nos d'un futur més net. Podem pagar una mica més per canviar per un món millor?

Recursos, bibliografia i internet

Recursos i bibliografia

- BOCKRIS, John O'M, VEZIROGLU, Nejat; SMITH, Debbi. *Hidrógeno solar: la energía limpia del futuro*. Santiago de Chile: Cuatro Vientos Editorial, 1994.
- COOK, Brian. *An introduction to fuel cells and hydrogen technology*. Vancouver: Heliocentris, 2001.
- DALTON, Jim. *National fuel cell education program pilot project*. Santa Barbara: Eco Soul, Inc, 2002.
- DUNN, Seth. *Hydrogen futures: towards a sustainable energy system*. Washington: Worldwatch Institute, 2001.
- HOFFMANN, Peter. *Tomorrow's energy. Hydrogen, fuel cells, and the prospects for a cleaner planet*. London: The MIT Press, 2001.
- RIFFKIN, Jeremy. *La economía del hidrógeno*. Barcelona: Paidós, 2002.

Internet

- <http://biohabitat.terra.org>; kits assequibles per produir hidrogen i mostrar el poder de l'hidrogen a l'escola sense perill.
- <http://www.aeh2.org>; web de la Asociación Española del Hidrógeno creada el 2002.
- <http://www.hydrogen.org/index-e.html>; articles, glossari, sumaris tècnics, base de dades, una bona eina a favor de la difusió de l'hidrogen.
- <http://www.hynet.org>; La Xarxa europea temàtica sobre l'hidrogen és una iniciativa de la Unió Europea; conté alguna publicació i una agenda d'events.
- http://www.pacificsites.net/~dglaser/h2/*links.html; una interessant col·lecció d'enllaços a diferents centres d'interès sobre l'hidrogen.
- <http://www.h2fc.com/tech.html>; un bon recull documental amb les principals tecnologies sobre piles de combustible.
- <http://www.bellona.no>; fundació noruega que disposa d'un brillant informe sobre l'hidrogen.
- <http://www.energyshortage.com>; una pàgina dedicada al declivi dels recursos fòssils.
- <http://www.fuelcellpark.com>; un passeig pels diferents tipus de cèl·lules de combustible,

projectes i altres temes relacionats.

- <http://www.bp.com/centres/energy2002>; dades sobre el consum de petroli.
- <http://www.fuelcellstore.com>; venda de productes domèstics relacionats amb la tecnologia de l'hidrogen als Estats Units.
- <http://www.fuelcells.org>; el centre on line d'informació sobre les piles de combustible amb abundants recursos per als professors; probablement, un dels espais web més interessants per consultar.
- <http://www.h-tec.com>; cèl·lules de combustible de demostració per a activitats educatives.
- <http://www.generalhydrogen.com/html/links.html>; enllaços a companyies, publicacions i associacions que divulguen l'hidrogen.
- <http://www.runningonempty.org/espanol.htm>; una pàgina molt interessant per reflexionar sobre la crisi del petroli.
- <http://directory.google.com/Top/Science/Technology/Energy/Hydrogen/>; directori web proposat pel buscador google.
- <http://www.ehgtechnology.com/Conversion%20Table.htm>; taula de conversió i equivalències de les diferents mesures emprades en gasos. Ahora, aquesta empresa és la responsable de la tecnologia d'electròlisi gravitacional..
- <http://education.lanl.gov/RESOURCES/H2/education.html>; recursos educatius aportats pel laboratori Los Alamos dels Estats Units. Selecció d'enllaços a altres materials pedagògics.
- <http://www.eren.doe.gov/hydrogen/basics.html>; especialment hi ha relacionats alguns documents divulgatius en format PDF sobre l'hidrogen.
- <http://www.dodfuelcell.com>; guia sobre els diferents tipus de piles de combustible.
- <http://americanhistory.si.edu/csr/fuelcells/index.htm>; historia de les cèl·lules de combustible
- http://www.altenergy.org/2/renewables/hydrogen_and_fuel_cells/hydrogen_and_fuel_cells.html; document que resumeix la tecnologia de l'hidrogen.
- <http://www.crest.org/hydrogen/index.html> pioners en la divulgació de les energies renovables; hi ha un bon dossier informatiu sobre l'hidrogen.
- <http://www.methanol.org>; conté imatges sobre els vehicles i desenvolupaments en hidrogen que empren metanol per fer anar la pila de combustible.