

TEMES

De les màquines tèrmiques a les piles de combustible. Reptes actuals i futurs de la conversió d'energia

Josep M. Salla Tarragó

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Resum

Les societats avançades necessiten cada vegada més energia d'alta qualitat per mantenir i augmentar el seu nivell de vida. Les màquines tèrmiques i la seva capacitat de convertir energia fòssil en energia més útil, com és, per exemple, l'electricitat, continuen sent unes valuoses eines, sense les quals difícilment s'haurien assolit ni es podrien mantenir les quotes de benestar actuals.

A causa dels efectes mediambientals provocats, del baix rendiment de conversió i de la dependència que es té del petroli, hi ha la consciència

cada vegada més estesa que s'ha arribat a una situació insostenible que obliga a buscar altres alternatives i altres maneres de fer.

En aquest treball s'explica quin paper poden tenir les piles de combustible com a alternativa a les màquines tèrmiques i com el binomi hidrogen-piles de combustible, pot contribuir a assolir els objectius d'unes estratègies que passen per l'estalvi d'energia, la millora del rendiment de conversió, la diversificació dels recursos i utilitzar, tant com es pugui, les anomenades *fonts d'energia renovables*.

1. Energia, calor, treball i màquines tèrmiques

Des de l'aparició de la màquina de vapor fins al dia d'avui, ningú no dubta que el desenvolupament del món tecnificat, anomenat també «desenvolupat», ha anat de la mà de poder utilitzar de forma convenient grans quantitats d'energia, el consum de la qual no ha parat de créixer. Als inicis de la Revolució Industrial, la màquina de vapor va suposar obtenir energia d'alta qualitat i a gran escala a partir d'una energia que era allí, i era coneguda, l'energia química de combustibles fòssils com el carbó, però que fins aleshores s'havia utilitzat per poc més que com a font de calor. En el transcurs dels anys, han aparegut altres màquines que ens proveeixen també d'energia d'alta qualitat i que han esdevingut imprescindibles, per exemple, els motors de combustió interna alternatius, artífexs del transport per carretera i marítim, o les turbines de gas en el transport aeri i, darrerament, cada vegada més emprades en la producció d'electricitat. Totes aquestes s'anomenen *màquines tèrmiques* perquè comparteixen amb la màquina de vapor la capacitat de transformar l'energia química d'un combustible no només en calor sinó en una energia més útil a l'activitat humana, energia que a partir d'ara anomenaré *treball* (W).

2. L'electricitat, exemple d'energia d'alta qualitat

Per diferenciar el treball de l'altra energia que la humanitat ha utilitzat des de temps immemorials, que coneixem pel nom de *calor* (Q), no fa falta

entrar en gaires tecnicismes sinó centrar-nos en l'ús quotidià que avui fem de l'electricitat. Amb l'energia elèctrica o el treball elèctric ens podem proveir, de forma còmoda i neta, de diferents formes d'energia que necessitem: llum, energia mecànica de tracció i potència per moure tot tipus d'estris i màquines i també calor, per mitjà d'estufes elèctriques. És, a més, fàcilment transportable i adaptable a una gran varietat d'aplicacions. L'electricitat és una energia manufacturada. A Catalunya i a l'Estat espanyol, actualment s'obté, en més d'un 75%, a partir de màquines tèrmiques que utilitzen com a font d'energia primària combustibles fòssils i energia nuclear.¹ La resta, prové de les anomenades «energies renovables»: centrals hidroelèctriques, parcs eòlics, biomassa i energia solar. Un repte i alternativa de futur és fer possible que la contribució de les energies renovables sigui cada vegada més gran. La situació ideal seria que tota l'electricitat del dia de demà es pogués produir a partir de fonts renovables.

3. Treball, rendiment i exergia

El treball, doncs, se'ns presenta com una energia concentrada, organitzada, dúctil i fàcilment transformable. La calor, per contra, és una energia més caòtica i desorganitzada, la qual cosa no implica, com s'acaba de dir, que no es pugui, a través de les màquines tèrmiques, transformar en treball. Les transformacions de la calor en treball s'estudien des de les anomenades «lleis de la termodinàmica», la primera de les quals ve a dir que en les transformacions de l'energia, en les conversions d'una forma a una altra, la quantitat total d'energia s'ha de conservar. La segona assenyala que no totes les transformacions són possibles, només aquelles que porten a un augment de l'anomenada *entropia de l'Univers*. És la conseqüència de l'existència de la que Atkins² anomena «*dissimetria fonamental en la natura*». Aquestes premisses, aplicades al funcionament de les màquines tèrmiques, porten a l'acceptació de dos fets inqüestionables: que no tota l'energia química o la calor que es desprèn en cremar un combustible es pot convertir en treball. I que l'energia que no es converteix, si bé no es perd, es degrada, es dilueix a l'atmosfera, queda inservible per sempre més. Aquestes consideracions porten als conceptes de *rendiment* i *exergia*,

dita també «energia disponible». El rendiment d'una màquina tèrmica es defineix com el quocient entre el treball que pot produir i l'energia en forma de calor que utilitza.

$$\eta = \frac{|W|}{|Q|} \quad [1]$$

Així, el rendiment η no pot ser mai igual o més gran que 1. Un dels pares de la termodinàmica, el francès Sadi Carnot³, l'any 1824, precisament intentant comprendre en profunditat el funcionament de les màquines de vapor i millorar el seu rendiment, va arribar a la conclusió que el treball que es podia obtenir d'una màquina tèrmica cíclica treballant entre dos focus de temperatura T_H i T_L era, com a molt, el producte de la calor per un coeficient funció de les temperatures, conegut com el «rendiment de Carnot».

$$|W|_{Carnot} = |Q| \cdot \eta_{Carnot} = |Q| \cdot \left(1 - \frac{T_L}{T_H} \right) \quad [2]$$

Aquesta idea, acceptada fins al dia d'avui en el mateixos termes en què va ser formulada per Carnot, ha estat molt fructífera per a l'evolució i la millora del disseny de les màquines tèrmiques. Com a mostra, només cal dir que les centrals tèrmiques de producció d'electricitat d'última generació, anomenades «de cicle combinat», són preuades perquè utilitzen com a combustible gas natural, d'entrada un combustible més net que els derivats del petroli o el carbó, i perquè poden assolir rendiments fins a un 55%. Tal vegada aquest rendiment pot semblar encara petit, però si es compara amb els rendiments d'entre 30-45% que aconseguixen les centrals tèrmiques anomenades «de turbina de vapor», o els mateixos motors de combustió interna de rendiment encara inferior, no hi ha dubte que suposen una millora important. Sense necessitat d'entrar en les interioritats del funcionament d'un cicle combinat, es pot comprendre que té un alt rendiment pel fet que és el resultat d'acoblar un cicle de turbina de vapor i un cicle de turbina de gas. Això fa que l'interval de temperatures entre les quals treballa sigui més

gran que amb el que funcionaria cadascun d'ells per separat, de manera que, d'acord amb l'equació [2], el rendiment és més gran. (Vegeu la figura

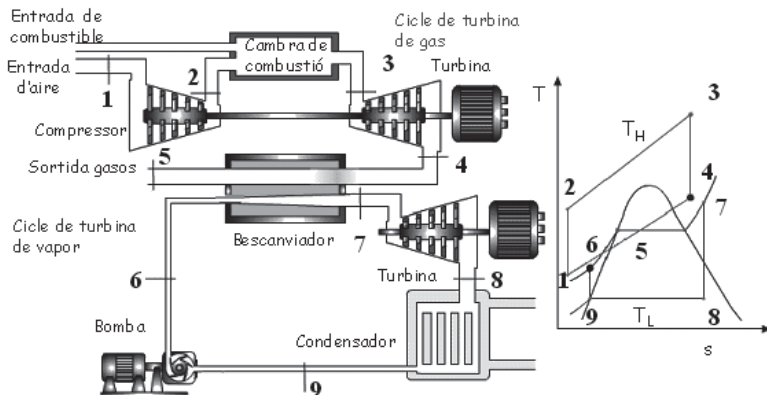


Figura 1. Esquema de funcionament d'un ciclu combinat i la seva representació en un diagrama on l'eix d'ordenades representa les temperatures de funcionament del ciclu

1).

Si ara ens preguntem quina part de l'energia que es troba emmagatzemada en forma de combustible realment es pot convertir en treball, la resposta, d'acord amb l'equació [1], serà que dependrà del rendiment de la conversió. Tot i això, d'acord amb l'equació [2], sempre es pot saber quin és el treball més gran que es pot esperar obtenir. Aquesta idea ens porta al concepte d'*exergia*, és a dir, la part de l'energia que es pot esperar, com a molt, que es converteixi en treball. La diferència entre l'energia i l'exergia es pot interpretar com el mínim tribut que hem de pagar a la natura pel fet de convertir la calor en una energia més noble, més útil, de més alta qualitat, que li diem «treball».

Si Q_R és la calor que es desprèn quan es crema un combustible, i $W_{\text{màxim}}$ és la seva exergia, hi ha dues maneres equivalents de calcular $W_{\text{màxim}}$. La primera s'expressa com:

$$|W_{\text{màxim}}| = |Q_R| \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T_H} \right) \quad [3]$$

Com es pot veure, és una fórmula molt semblant a la de l'equació [2], T_H fa referència igualment a l'alta temperatura a la qual es trobaran els gasos resultants de la combustió, mentre que T_o no és una temperatura per sota de T_H qualsevol sinó que és la temperatura ambient (la temperatura més baixa de totes les naturalment possibles). L'altra forma és:

$$|W_{m\grave{a}xim}| = |Q_R| - T_o \cdot |\Delta S| \quad [4]$$

sent $|\Delta S|$ el que els llibres especialitzats anomenen «entropia de combustió» i T_o continua sent la temperatura ambient. El producte $T_o \cdot |\Delta S|$ representa la part de l'energia química del combustible que no es transformaria en treball, en el supòsit que l'alliberament d'energia de la reacció de combustió es fes a temperatura constant T_o . Més endavant, quan s'expliqui com funcionen les piles de combustible, s'entendrà per què s'ha volgut expressar el mateix concepte, el treball màxim que es pot obtenir de l'energia química d'un combustible, de dues formes diferents (equacions [3] i [4]).

4. El problema de les fonts d'energia primària

El que hem dit fins ara es pot resumir dient que els països desenvolupats necessiten grans quantitats d'energia d'alta qualitat que s'obté en processos de transformació, amb rendiments no gaire elevats, a partir de quantitats d'energia primària que, com a conseqüència, encara són més grans. Una estratègia per posar fre a aquest consum és, evidentment, estalviar-ne per tots el mitjans possibles. Un repte actual i de futur, si no es vol renunciar al grau de benestar assolit, és aconseguir millorar els processos o trobar-ne de nous per augmentar el rendiment de conversió i provocar d'aquesta manera l'estalvi desitjat.

Una altra estratègia a seguir és trobar noves fonts de subministrament d'energia o diversificar tant com sigui possible les que actualment es fan servir. Això suposa un problema i un repte prou conegut de tots, del qual els mitjans de comunicació sovint, per no dir cada dia, es fan ressò. És ben coneguda la dependència de les economies occidentals dels combustibles fòssils, sobretot del petroli,

imprescindible en el sector del transport. En el nostre entorn, el petroli continua sent la font d'energia primària més emprada (més del 50%). El futur del seu subministrament és incert. A les tensions que s'arrossegueuen des de fa temps per culpa de la concentració geogràfica de les reserves amb les rivalitats geopolítiques que això comporta, i la concentració de l'extracció i la distribució en molt poques companyies petrolieres, cal afegir-ne ara d'altres no menys preocupants. Per exemple, els analistes adverteixen que no cal que s'arribi a la constatació del seu esgotament perquè la tendència inflacionista sigui imparable. De fet, en el darrer any, el preu del barril de cru s'ha situat a unes quotes fins fa molt poc inimaginables. Un altre advertiment és els desequilibris entre l'oferta i la demanda de cru que poden provocar les economies del Sud-est asiàtic i d'altres països emergents. És curiós i significatiu constatar que l'any 2002, la Xina estava per darrere d'Espanya com a país importador de petroli. Actualment, no solament va per davant sinó que s'ha convertit en el tercer importador del món, només superat pels EUA i el Japó.⁴

És coneguda també la controvèrsia que hi ha en la utilització de l'energia nuclear com a font energètica present i de futur. Països com França o els EUA continuen amb els seus plans d'utilització d'aquesta energia. En canvi, països com Alemanya o el nostre han decidit no continuar amb la política de construcció de noves centrals nuclears. Recentment, la discussió per l'enclavament d'un reactor, no de fissió nuclear, sinó de fusió (anomenat «programa ITER»), ha donat a conèixer a l'opinió pública la possibilitat de proveir-nos d'energia de la manera amb la qual ho fan les estrelles. Tots els experts, però, asseguren que han de passar molts anys (més de cinquanta) per saber si aquesta possibilitat es podrà fer realitat.

Entretant, s'han creat moltes expectatives entorn de les anomenades «fonts d'energia renovables», sobretot la solar, l'eòlica, la hidràulica i la que es pot extreure de la biomassa. Les estadístiques no són gaire encoratjadores. Actualment, malgrat la proliferació de parcs eòlics (som el segon país del món en potència eòlica instal·lada), l'ús del conjunt d'energies renovables al nostre país suposa menys d'un 6% del consum d'energia primària. A la Comunitat Europea i en l'horitzó de l'any 2010, els plans són que la seva contribució arribi només a un 12%.⁵

5. Els efectes col·laterals de l'ús i de la conversió d'energia

Amb l'eufemisme *efectes col·laterals* vull referir-me als perills mediambientals i de futur que suposa l'ús massiu i descontrolat de l'energia. Avui es tenen arguments i la consciència que el perill d'emprar les fonts d'energia com s'ha fet fins ara, no solament pot provocar catàstrofes puntuals, tots tenim a la memòria l'enfonsament del petrolier *Prestige* i els seus efectes en la costa gallega, sinó que poden ser efectes persistents, globals i irreversibles. És el cas de l'augment antropogènic del CO₂ a l'atmosfera i els efectes que pot provocar en l'escalfament de la Terra per l'efecte hivernacle amb les conseqüències que se'n poden derivar.⁶ Aquí, els reptes i l'estratègia a seguir, es poden resumir dient que cal trobar la manera d'utilitzar l'energia sense malmetre el medi natural ni hipotecar el futur, és a dir, de forma sostenible.

6. D'una economia basada en el petroli a una economia de l'hidrogen

J. Rifkin, en el llibre titulat en la versió espanyola *La economía del hidrógeno. La creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la Tierra*⁷, analitza en profunditat els reptes i problemes actuals derivats de l'ús que les societats avançades fan de l'energia. Ho fa esgrimint arguments tant tècnics com econòmics, socials i polítics. Malgrat no estar d'acord amb el to apocalíptic i visionari en què ho diu, crec que el diagnòstic que fa de la situació actual és encertat i les solucions que proposa de cara al futur, si més no, dignes de ser considerades. En síntesi, Rifkin diu que per culpa de la dependència del petroli, la civilització actual està abocada a una crisi sense precedents en tots els aspectes dels seus modes de vida i que és absolutament necessari trobar una font d'energia alternativa al petroli. La seva aposta per a l'energia del futur és l'hidrogen. A més, conclou les seves argumentacions dient que amb la utilització de l'hidrogen i la possibilitat de crear xarxes de conversió i distribució d'energia diferents a les que es coneixen fins ara, es produiria el que anomena «la democratització de l'energia» amb beneficis tant mediambientals com socials.

7. L'hidrogen

El primer que cal dir sobre l'hidrogen és que no es troba lliure a la natura si bé, combinat amb l'oxigen en forma d'aigua i en altres substàncies tant orgàniques com inorgàniques, és molt abundant, i contribueix al 70% de la matèria sobre la superfície de la Terra. L'hidrogen en condicions atmosfèriques és un gas molt lleuger, 14 vegades més que l'aire i no es troba habitualment en forma lliure perquè és químicament molt actiu. Com a combustible, l'hidrogen és el que té un contingut més alt d'energia per unitat de massa (quan es crema allibera una energia de 120,7 MJ/kg), més del doble que el del gas natural i quasi el triple que el de la benzina. Per contra, per la seva baixa densitat, en forma gasosa i per unitat de volum, el seu contingut d'energia és 1/3 del gas natural i 1/4 del de la benzina. L'hidrogen líquid, que a pressió atmosfèrica es troba per sota dels -252°C , suposa una reducció de volum respecte a l'estat gasós de més de 1/700, cosa que fa que sigui una de les formes més compactes d'emmagatzemar i transportar energia.

Actualment, si s'exceptua la utilització de l'hidrogen en vols espacials, l'ús de l'hidrogen se circumscriu a la indústria química i petroquímica (producció d'amoníac, etilè o metanol) o es produeix com un inevitable subproducte (és el cas de la fabricació de clor per electròlisi). També es produeix a les refineries per autoconsum (producció d'hidrogen en processos de *termocracking* i consum d'hidrogen en processos de dessulfuració i hidrogenació). Aquestes circumstàncies fan que es pugui dir que estan ben assentades les tecnologies que permeten la fabricació d'hidrogen a gran escala, a partir bàsicament de combustibles fòssils i de l'aigua.⁸ El reformat amb vapor del gas natural, és el procediment menys costós a preus de mercat actuals. Altres procediments són l'oxidació parcial de l'hidrogen provinent de fraccions pesades del petroli o del carbó o del mateix gas natural i l'electròlisi de l'aigua a baixa pressió. Aquesta última, la separació de l'hidrogen i l'oxigen de l'aigua per mitjà de l'electricitat, és una de les més cares. Perquè l'hidrogen esdevingui en el futur un combustible renovable és necessari aconseguir produir-lo a partir de matèries o de fonts d'energia també renovables. La recerca que s'està fent en aquest sentit és notable. Per exemple, s'han fet considerables progressos en els rendiments

de l'obtenció de l'hidrogen a partir de la piròlisi i gasificació de biomassa o a partir del biogàs resultant de la seva fermentació anaeròbia.⁹ També s'està investigant en l'obtenció directa d'hidrogen per processos fotobiològics, utilitzant algues i energia solar.¹⁰

També es pot dir que es té igualment un bon coneixement de les tecnologies per al transport, emmagatzematge i distribució de l'hidrogen. La forma de fer-ho és com a gas a pressió o gas líquat. Països del nostre entorn com Alemanya i França, entre d'altres, tenen ja infraestructures de certa consideració, tant pel que fa a l'emmagatzematge de l'hidrogen com per al seu transport via gasoducte o per superfície, així com plantes de líquefacció. També es disposa d'un considerable nombre de normes i protocols per tal que el seu ús es faci amb totes les garanties de seguretat.

Que l'hidrogen és un excel·lent combustible ho demostra la mateixa tendència històrica de l'ús de matèria primera per a la combustió. De la fusta o el carbó al petroli i del petroli al gas natural, representa una evolució que tendeix a utilitzar combustibles cada vegada més rics en hidrogen. El més remarcable és que l'hidrogen, quan es crema, l'únic producte que forma és aigua, si s'eviten els productes de nitrogen i oxigen que es poden formar per les altes temperatures a les quals s'arriba. Es tracta doncs, d'un combustible net i que no produeix contaminació. Hi ha estudis ben fonamentats i també prototipus de prova que demostren que l'hidrogen pot substituir amb avantatges derivats del petroli i el gas natural per moure turbines de gas i motors de combustió interna en sectors com l'automoció, la cogeneració i l'aviació.¹¹ Dit això, l'interès d'aquest treball és parlar de l'hidrogen només amb relació a les anomenades «piles de combustible».

8. Les piles de combustible

Les piles de combustible són sistemes electroquímics capaços de convertir directament l'energia química d'un combustible en electricitat. Hi ha pocs combustibles adients per fer funcionar una pila de combustible. De fet, directament o indirectament, el combustible de les piles de combustible és l'hidrogen.^{12,13} La pila de combustible produeix l'oxidació

del combustible per una via totalment diferent a la combustió convencional, purament electroquímica. Pot recuperar directament els electrons alliberats per la reacció de combustió i generar electricitat, amb la qual cosa s'eviten pèrdues associades tant a la combustió com a les altres etapes de transformació que hi ha en una central tèrmica actual.

Pot sorprendre que la primera pila de combustible fou fabricada per William Grove¹⁴ l'any 1839, pocs anys després que Carnot escrivís les seves famoses reflexions sobre les màquines tèrmiques i de fet abans que aquestes fossin publicades, l'any 1878. Per tant, no es tracta d'un invent recent. Entre 1930 i 1950, els treballs de Francis Bacon van portar a la materialització d'un tipus de pila, coneguda com a «pila de combustible alcalina», amb les prestacions adequades perquè la NASA, des d'aquells temps fins al moment present, les hagi utilitzat per proveir l'electricitat a bord de les naus de tots els seus programes de l'espai, des del programa Gèminis, passant per l'Apol·lo fins als actuals associats a la llançadora espacial.

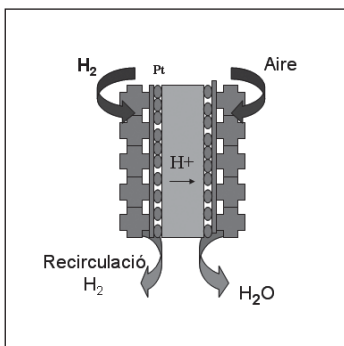


Figura 2. La cel·la elemental d'una pila de combustible

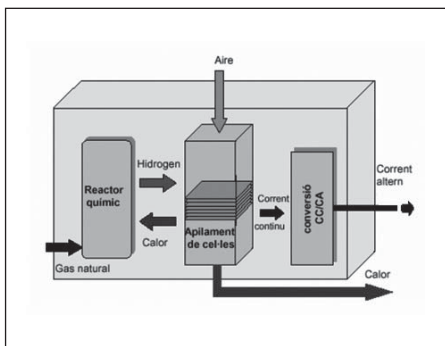
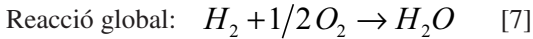
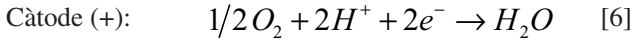
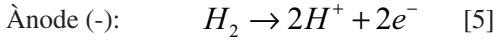


Figura 3. Subsistemes que poden integrar la pila de combustible

Una pila de combustible és el resultat de la juxtaposició o l'apilament de cel·les elementals. Cada cel·la elemental consta de dos elèctrodes i un electrolit (figura 2). Als elèctrodes, fabricats de material porós conductor de l'electricitat i usualment dopats amb catalitzador, és on es produeixen les reaccions d'oxidació-reducció. A l'ànode l'hidrogen molecular es converteix en ió a la vegada que cedeix dos electrons. Al càtode els ions

hidrogen es combinen amb l'oxigen i els electrons per donar aigua. Escrivint aquests processos reactius de la forma habitual queden així:



L'electròlit és el mitjà que permet el transvasament intern dels ions des de l'ànode fins al càtode. Els electrons circulen pel circuit extern i produeixen l'electricitat. La naturalesa dels ions que transporten la càrrega en el si de l'electròlit depenen d'aquest. Els ions (H^+) emigren des de l'ànode fins al càtode en un electròlit àcid. Els ions (OH^-) emigren del càtode a l'ànode en un electròlit alcalí. Els ions CO_3^{2-} transporten la càrrega del càtode a l'ànode en un electròlit de sals de carbonat i igualment el ions O^{2-} emigren del càtode a l'ànode en un electròlit d'òxids sòlids. De fet, el tipus d'electròlit i la temperatura de treball són els qui marquen les diferències dels diferents tipus de pila de combustible que avui es coneixen.

En condicions atmosfèriques, a la temperatura de 25°C (298 K), l'energia alliberada per cada mol (18 grams) d'aigua formada, Q_R , val 285.800 joules, mentre que l'electricitat que es pot produir, W_{\max} , d'acord amb l'equació [4], val 237.200 joules. Aquestes xifres permeten fer una estimació teòrica del rendiment de la conversió. D'acord amb l'equació [1], dividint el treball produït per la calor alliberada dona $0,83$. És a dir, l'electricitat produïda és un 83% de l'energia alliberada per l'hidrogen. És un rendiment molt alt si es compara amb el rendiment de qualsevol central tèrmica de producció d'energia elèctrica. Fent ús de l'equació [3], substituint els valors esmentats, resulta que per obtenir el mateix rendiment, una màquina tèrmica hauria de treballar a una temperatura T_H per sobre dels 1.400°C , temperatura usualment inaccessible perquè supera el límit metal·lúrgic de molts materials. A més, si s'observen tots els passos que s'han de seguir per obtenir electricitat en una central tèrmica (figura 1) i en una pila de combustible (figures 2 i 3), de forma intuïtiva s'arriba igualment al convenciment que la pila de combustible suposa una forma de produir electricitat més directa i eficient que qualsevol altra coneguda fins ara.

A banda dels aspectes termodinàmics i de la cinètica dels processos de reacció que expliquen el comportament d'una cel·la elemental o d'una pila, és sobretot l'efecte i la presència de catalitzadors el que fan que les transformacions electroquímiques i la producció d'electricitat es puguin produir a un ritme adequat. D'aquí la importància del disseny dels elèctrodes, de l'elecció de l'electròlit i del catalitzador. En l'apilament de les cel·les, aspectes de la geometria del disseny i de les característiques dels materials de què estan fabricades tenen també un paper important. És necessari que l'hidrogen i l'oxidant arribin als elèctrodes de forma adequada. Cal evitar camins preferents tant en el moviment de les espècies químiques com de l'electricitat produïda. Cal pensar en el reciclat de l'hidrogen, en l'evacuació de l'aigua i en la dissipació i/o recuperació de la calor generada.

És usual que dintre del sistema pila de combustible hi hagi diferents subsistemes que, treballant de forma integrada, puguin utilitzar un combustible que no sigui l'hidrogen per generar electricitat alterna amb una potència i un voltatge adequats. Per exemple, una pila de combustible que utilitza gas natural, primer, el gas natural passa per un reformador que produeix hidrogen que és el que s'introdueix a la pila de combustible pròpiament dita. El corrent continu passa a corrent altern i al voltatge adequat en un convertidor corrent continu-corrent altern. La calor produïda pot fer-se servir internament per produir el vapor necessari per al funcionament del reformador o bé s'utilitza externament a la manera dels sistemes de cogeneració (vegeu la figura 3).

9. Els tipus de piles de combustible

Les diferents piles de combustible que es poden trobar ja al mercat o sobre les quals s'està investigant més intensament¹² es diferencien per l'electròlit que fan servir, per la temperatura de treball, pel catalitzador emprat i pels usos que poden tenir. A la taula 1 es mostren de forma sintètica les seves característiques. La pila de combustible alcalina (AFC), la de membrana polimèrica d'intercanvi de protons (PEMFC) i la pila de metanol (DMFC), com una variant de la PEMFC, són adients per ser utilitzades en aplicacions mòbils i automoció. En canvi, la pila de combustible d'àcid fosfòric (PAFC), la

de carbonats fosos (MCFC) i la d'òxids sòlids (SOFC) estan pensades per a aplicacions fixes, per produir a la vegada electricitat i calor en sistemes de cogeneració o sistemes híbrids on l'electricitat es produeix tant de la pila de combustible com la que es pot extreure de la calor que s'allibera, fent passar els gasos calents per microturbines de gas.

Típus	Electròlit	Típus de càrrega transferida	Temperatura de treball (°C)	Combustible	Oxidant
AFC (Pila de combustible alcalina)	Solució de KOH	OH ⁻	60-80	H ₂	O ₂
PEMFC (Pila de membrana polimèrica)	Membrana polimèrica d'intercanvi de protons	H ⁺	80-100	H ₂ produït amb hidrocarburs.	Aire
DMFC (Pila de metanol)	Membrana polimèrica d'intercanvi de protons	H ⁺	80-100	Metanol	Aire
PAFC (Pila d'àcid fosfòric)	Àcid fosfòric	H ⁺	180-200	H ₂ produït amb hidrocarburs	Aire
MCFC (Pila de carbonats fosos)	Mescla de Li ₂ CO ₃ i de K ₂ CO ₃ fosos en una matriu de LiAlO ₂	CO ₃ ²⁻	630-650	H ₂ produït amb hidrocarburs	Aire
SOFC (Pila d'òxids sòlids)	Òxids de Zirconí ZrO ₂ i Itri Y ₂ O ₃ estabilitzats	O ²⁻	900-1000	H ₂ i CO produït amb hidrocarburs	Aire

Taula 1. Característiques dels diferents tipus de piles de combustible

10. Les piles de combustible i l'hidrogen, vector energètic per excel·lència

L'hidrogen i les piles de combustible es necessiten i complementen per aconseguir la conversió més eficient possible de l'energia d'un combustible en electricitat. Al contrari que les piles i els acumuladors electroquímics convencionals, les piles de combustible no poden emmagatzemar energia per si mateixes, cosa que es pot fer a través de l'hidrogen. D'aquesta simbiosi entre l'hidrogen i les piles de combustible, alguns creuen que pot sorgir-ne el vector energètic de futur per excel·lència, capaç de produir, emmagatzemar, transportar, distribuir i utilitzar energia de forma eficient tot respectant el medi ambient. La forma de procedir podria ser la següent:

utilitzant recursos renovables o energia primària convencional es pot produir electricitat per fabricar hidrogen, a través de l'electròlisi de l'aigua. Aquestes instal·lacions no tenen perquè ser a prop dels llocs de consum ni estar supeditades a la demanda temporal externa d'electricitat, cal no oblidar que l'energia elèctrica per si mateixa no es pot emmagatzemar i es produeix en funció del consum temporal. L'hidrogen es pot emmagatzemar o transportar als llocs de consum per mitjà de dipòsits a pressió o en forma líquida o utilitzant gasoductes. Al lloc de consum, l'hidrogen pot ser utilitzat directament com a combustible o a través de la pila de combustible i convertir la seva energia altre cop en electricitat.

A més, les piles de combustible pel fet de ser «apilables», és a dir, que gràcies a la juxtaposició de cel·les elementals poden generar potències elèctriques que van dels pocs watts als megawatts afavoreixen que la generació d'electricitat es faci a prop de cada usuari i a la seva mida, per estalviar moltes pèrdues no només de generació sinó de transport i distribució. Són molt adients per passar d'una gestió centralitzada de l'electricitat a una gestió distribuïda.

11. Els sectors emergents d'aplicació de les piles de combustible

Quan es parla de les aplicacions actuals i futures de les piles de combustible, dels sectors emergents on més ràpidament es poden introduir i del potencial d'activitat econòmica que poden ocasionar, diferents analistes estan d'acord a assenyalar-ne quatre a més del mateix sector d'activitat relacionat amb la producció, transport, emmagatzematge i distribució de l'hidrogen.¹⁵ Aquests sectors i per ordre de menys a més impacte econòmic són:

- Generadors elèctrics de petita potència, transportables, utilitzats com a equips d'emergència o de suport i complement del subministrament elèctric habitual o alternativa puntual a l'ús de l'electricitat via xarxa.
- Piles de combustible de molt petita potència (micropiles de combustible), portàtils, per a ús com piles i acumuladors en telefonia mòbil, ordinadors portàtils i altres electrodomèstics o equips digitals portàtils.

- Generadors de petita o mitjana potència estacionaris. Equips per a cogeneració (producció conjunta d'electricitat i calor). Equips generadors d'electricitat per a edificis d'ús comercial, industrial, residencial i en instal·lacions remotes (on no hi arriba la xarxa elèctrica). (Vegeu les figures 4 i 5).

- Generadors de potència per a motors elèctrics per a vehicles diversos: cotxes, autobusos, motocicletes, també per a embarcacions. Subministradors auxiliars d'electricitat als equips electrònics «a bord» de tota mena de vehicles i mitjans de transport. Aquest últim sector mereix un comentari a part.

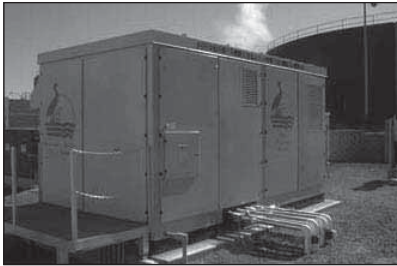


Figura 4. Pila del tipus PAFC de 250 kW d'UTC



Figura 5. Pila del tipus SOFC de 166 kW de Siemens

12. Les piles de combustible i l'automoció

Parlar del «cotxe elèctric» avui dia no és cap novetat. És sabut que des de fa temps al mercat es poden trobar diferents tipus de vehicles moguts per un motor elèctric que agafa l'electricitat d'una bateria o acumulador, que prèviament s'ha carregat també per mitjà d'energia elèctrica. Ni per les prestacions, ni per l'autonomia, ni pel seu rendiment, ni per les inconveniències de la fabricació i manteniment de les bateries, es consideren com a alternativa dels cotxes convencionals actuals. Més recentment, han aparegut al mercat els cotxes anomenats «híbrids» que combinen un motor de combustió estàndard amb un motor elèctric. La combinació d'ambdós fa possible un rendiment més bo i, per tant, un menor consum de combustible.

La utilització d'hidrogen i piles de combustible en l'automoció faria possible cotxes amb prestacions equivalents als estàndards actuals però sense produir contaminació. En la mesura que l'hidrogen s'obtingués per vies diferents a la d'utilitzar fraccions del petroli, suposaria posar fi a la

dependència quasi absoluta que hi ha entre el sector del transport i aquesta font d'energia fòssil. Per tant, la possibilitat d'utilitzar vehicles moguts per l'electricitat generada en piles de combustible és, sens dubte, d'una importància i transcendència molt gran. Es poden assenyalar ja alguns fets que demostren que els actors que han de liderar aquests canvis han agafat el tema molt seriosament. Un fet és que països com els EUA, el Japó o la mateixa Comunitat Europea han destinat, els darrers anys, sumes importants de diners per investigar i promoure l'ús d'aquesta tecnologia. Però encara és més significatiu el fet que els principals fabricants d'automòbils tenen dissenyats i han construït prototipus de cotxes de pila de combustible, que han donat a conèixer a l'opinió pública com els cotxes del futur. Un exemple es mostra a la figura 6. El denominador comú de tots ells és que funcionen amb el tipus de piles de combustible de les denominades PEM (de membrana polimèrica de protons), alimentades amb hidrogen que s'emmagatzema a bord del vehicle a pressió o líquid. Alguns d'aquests admeten combustibles convencionals com la benzina o el metanol perquè disposen d'un reactor que transforma el combustible en hidrogen. A títol anecdòtic, es pot explicar que la ciutat de Barcelona és una de les ciutats europees que participa actualment en el programa CUTE, dissenyat per demostrar la viabilitat d'utilitzar les piles de combustible en autobusos urbans. Els que habitualment utilitzen el transport públic tenen, doncs, l'oportunitat de pujar a un dels tres autobusos que l'empresa TMB disposa amb aquesta tecnologia i comprovar com a usuaris que les prestacions són les mateixes que les dels altres autobusos, amb una diferència, que pel tub d'escapament només surt aigua (vegeu la figura 7).

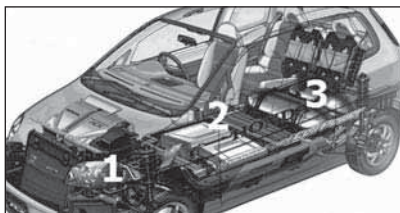


Fig. 6. Cotxe de pila de combustible model FCX Honda de 80 kW de potència màxima. 1) Motor elèctric. 2) Pila de combustible. 3) Dipòsits d'hidrogen



Fig. 7. Autobús de pila de combustible model Citaro Mercedes Benz O530 de l'empresa TMB, de 225 kW de potència

13. Obstacles i entrebancs en la utilització de les piles de combustible

Després d'explicar les excel·lències d'utilitzar les piles de combustible, és necessari comentar els obstacles i entrebancs de tota mena que cal superar perquè les piles de combustible esdevinguin una alternativa real al paper que actualment tenen les màquines tèrmiques en l'obtenció d'energia d'alta qualitat.

Començant per les limitacions de tipus tècnic, s'ha de dir que tant per aspectes relacionats amb els materials, com pels processos de fabricació a gran escala, com per la forma d'aconseguir un combustible idoni, avui dia, pràcticament cap de les tipologies de piles de combustible està prou madura encara perquè se'n puguin fabricar en grans quantitats.

Un altre aspecte important a tenir en compte és la competència i els costos amb relació a tecnologies i sistemes similars. En moltes de les aplicacions estacionàries, les piles de combustible hauran de competir i substituir generadors basats en una gran varietat de motors de combustió interna alternatius, motors a gas, microturbines i turbines de gas. El cost d'aquests sistemes en funció de la potència i el tipus d'aplicació pot oscil·lar entre els 25 /kW i els 450 /kW. Per contra, les piles de combustible que hi ha actualment al mercat tenen un cost que pot oscil·lar entre els 2.500 /kW i els 30.000 /kW. Alguns analistes sostenen que per arribar a ser competitives, el cost de les piles de combustible s'hauria de reduir per sota dels 1.000 /kW. En el sector de l'automoció aquest cost s'hauria de reduir encara molt més, fins als 60-100 /kW. El cost de petites bateries i de cel·les fotovoltaïques pot oscil·lar avui entre els 4.000 /kW i els 10.000 /kW.¹⁶

Barreres quant al combustible. El fet que l'hidrogen s'hagi d'obtenir de combustibles fòssils o a través de l'electròlisi de l'aigua, posa en qüestió molts dels arguments que avalen l'excel·lència de les piles de combustible. Per altra banda, les tecnologies i les vies per obtenir un hidrogen «ecològic» i «sostenible» no semblen encara del tot garantides.

Barreres de tipus institucional i financer. Passar d'una economia energètica basada en el petroli a una altra basada en l'hidrogen, suposa crear nous mercats, noves infraestructures i inversions considerables. És a dir, una verdadera revolució plena d'incerteses. Un exemple

evident de tipus logístic: la sortida massiva al mercat de cotxes de pila de combustible suposaria abans o al mateix temps crear una xarxa de benzineres que en lloc dels combustibles habituals, o a més d'aquests, haurien de subministrar hidrogen. Per altra banda, el poc coneixement que encara es té d'aquestes tecnologies i el canvi que suposarien respecte a la situació actual, posen també incertesa a l'acceptació social que pugui tenir el seu ús.

14. Un cycle energètic de conversió només amb aigua. Una quimera, una utopia o una realitat?

De tant en tant apareixen notícies en els mitjans de comunicació com la de l'inventor que ha dissenyat un cotxe amb un motor que només necessita aigua per funcionar, o la dels investigadors que han aconseguit la fusió freda de l'hidrogen. Mirades amb benevolència, aquestes notícies només són quimeres que reflecteixen l'ànima de trobar d'una forma senzilla i definitiva la solució a problemes que són profunds i complexos.

Per acabar aquest escrit i a manera de resum, ve a tomb parlar del cycle energètic de conversió només amb aigua resultat d'utilitzar l'hidrogen i les piles de combustible de la manera que s'ha explicat. No és una quimera, en tot cas una utopia, avui possible però inaccessible a gran escala, que tal vegada en el futur sigui una realitat.

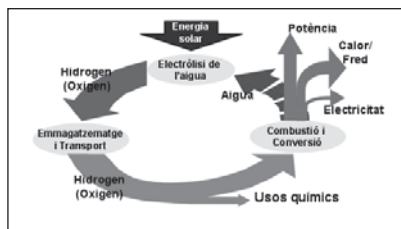


Figura 8. Un cycle energètic de conversió d'aigua. Obtenció de tots els tipus d'energia necessaris només a partir d'energia solar i aigua

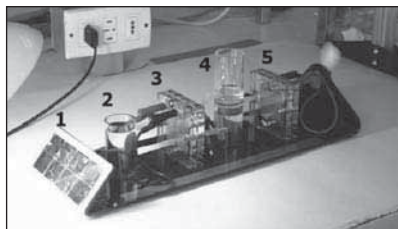


Fig. 9. Muntatge de demostració del cycle energètic de conversió d'aigua. 1) Panell fotovoltaic. 2) Dipòsit d'aigua. 3) Electrolitzador. 4) Dipòsit d'hidrogen. 5) Pila de combustible

Actualment se sap la manera de produir electricitat, a partir de l'energia del Sol utilitzant panells solars fotovoltaics. Amb l'electricitat produïda, fent servir aigua i per mitjà de la seva electròlisi es pot separar l'hidrogen de l'oxigen i emmagatzemar-lo o transportar-lo al lloc de consum. Amb això s'aconsegueix —evidentment amb els rendiments corresponents— convertir energia solar, energia de baixa qualitat per a segons quines aplicacions, en energia en forma d'hidrogen, de molt alta qualitat, que a més es pot emmagatzemar i transportar a conveniència. En el lloc de consum, com ja s'ha dit, l'hidrogen es pot fer servir com a combustible per generar calor, en màquines tèrmiques per produir treball i potència o a través de les piles de combustible, generar un altre cop electricitat, per a tots els usos que aquesta permet, tot això, produint, a més, aigua. És a dir, es pot aconseguir tot tipus d'energia d'alta qualitat que les societats avançades demanen, sense provocar contaminació i de forma sostenible, en un procés cíclic on a l'inici i al final només intervé l'aigua i fent servir el Sol com a única font d'energia (vegeu les figures 8 i 9).

15. Conclusions

Des de la Revolució Industrial fins al present, les societats avançades han fet servir les màquines tèrmiques i la seva capacitat de convertir energia primària en treball, per satisfer una demanda cada vegada més important d'energia d'alta qualitat com és, per exemple, l'electricitat.

A causa de la utilització massiva de combustibles fòssils, el baix rendiment de conversió, la dependència que es té del petroli i els efectes mediambientals provocats, la situació actual a què s'ha arribat obliga a buscar altres alternatives. Les estratègies a seguir passen per l'estalvi, la millora dels rendiments i la diversificació de les fonts d'energia utilitzant tant com es pugui les anomenades «energies renovables».

Les piles de combustible com a alternativa a les màquines tèrmiques per convertir energia d'un combustible en electricitat, quant al seu rendiment i al fet de no produir contaminació, tenen certament avantatges. També des d'un punt de vista logístic per poder configurar una xarxa de distribució descentralitzada o no haver de supeditar l'oferta a la demanda temporal.

A on, però, poden tenir més interès, si les expectatives creades es fan realitat, és en l'automoció, perquè poden trencar la dependència que hi ha d'aquest sector en relació amb el petroli. No obstant això, són molts encara els obstacles i entrebancs que cal superar. El primer és que el combustible idoni de les piles de combustible és l'hidrogen, que no es troba com a tal en estat natural, que s'ha d'obtenir a partir d'altres recursos i no està garantit que es pugui aconseguir de recursos renovables.

16. Agraïments

Al que va ser un company entranyable al Laboratori de Termodinàmica de l'ETSEIB i des d'aleshores, i per sempre, un amic i un mestre, el professor Santiago Riera i Tuèbols. En aquest treball he parlat de termodinàmica, de conversió d'energia, de màquines tèrmiques i d'una utopia. És una temàtica ben coneguda pel professor Riera, que probablement l'hauria explicat molt millor que jo. Em sentiré content, però, si a través d'aquest escrit, pot entreveure, després del temps transcorregut, avui encara, el meu agraïment i la satisfacció d'haver compartit amb ell aquella època.

Al professor Jordi Casassas Ymbert, per haver-me invitat a participar en aquest homenatge i no posar cap tipus d'impediment ni a la forma ni al fons d'aquest escrit.

17. Referències

1. *Boletín nº 6. Eficiencia Energética y Energías Renovables*, IDAE. Madrid. 2004.
2. P.W. ATKINS, *La segunda ley*, Barcelona, Prensa Científica, 1992.
3. *Statistical Review of World Energy 2005*. British Petroleum. 2005.
4. Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015. ICAEN. 2005.
5. *Energy to 2050. Scenarios for a sustainable future*. IEA. 2003.
6. J. RIFKIN. *La economía del hidrógeno. La creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la Tierra*, Barcelona, Editorial Paidós, 2002.

7. IEA. *Information about the Hydrogen Implementing Agreement. The International Energy Agency (IEA)*. 2001.
8. A.V. BRIDGWATER et al. Ed., *Fast Pyrolysis of Biomass*, UK, CPL Press, 1999.
9. MELIS et al., «Sustained Photobiological Hydrogen Gas Production upon Reversible Inactivation of Oxygen Evolution in the Green Alga *Chlamydomonas Reinhardtii*», *Plant Physiology*, American Society of Plant Physiologists, 122, 2000, p. 127-136.
10. A. CONTRERAS, S. YIGIT, K. AZAY, T.N. VEZIROGLU. «Hydrogen as aviation fuel: A comparison with hydrocarbon fuels». *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 22, 1997, p. 1053-1060.
11. W. VIELSTICH, A. LAMM, H. GASTEIGER. *Handbook of Fuel Cells. Fundamentals Technology and Applications*. Volumes 1, 2, 3 i 4. Wiley. 2003.
12. U. BOSSEL, B. ELIASSON, *Energy and the Hydrogen Economy*. European Fuel Cell Forum. 2003.
13. W. GROVE. *Philosophical Magazine*. Ser. 3, 14, 127. 1839.
14. The Athena Institute. Prospects for the fuel Cell Sector. 2003.
15. «Fuel Cell Market Survey: Stationary Applications». *Fuel Cell Today*. 2002.
16. Breakthrough Technologies & U.S. Fuel Cell Council. Fuel Cells for Portable Power: Markets, Manufacture and Cost. 2003.