

PILES DE  
COMBUSTIBLE:  
UN MÓN PER  
DESCOBRIR



### Presentació

Un futur viable és una de les màximes preocupacions en la nostra societat tenint en compte el poder de l'ecologia i els seus estudis buscant alternatives a allò que ens ha estat mantenint però alhora contaminant durant molts anys. Existeixen múltiples problemes dels quals preocupar-se de cara als anys pròxims: com l'escassetat d'aigua potable, el canvi climàtic, la desforestació, l'extinció d'espècies animals i vegetals... A tots se'ls està buscant solució per no acabar amb el planeta. Un dels més importants és la recerca d'energies renovables ja que ens estem quedant sense recursos energètics bàsics com el petroli. I una d'aquestes múltiples solucions té a veure amb les piles de combustible, un recurs que amb el temps s'espera que serà més accessible i amb el que s'haurà de comptar pel funcionament de mitjans de transport i aparells elèctrics comuns en les nostres vides. Obtenir els mateixos resultats a partir d'un combustible que no contamina, ni en la seva obtenció, l'hidrogen. En aquest treball em centraré en aquest recurs i n'analitzaré l'estat actual i el que se'n pot extreure en les nostres vides.

Vaig escollir aquest tema perquè em va ser comentat per la meua tutora, que me'l va presentar com un tema interessant del que en podríem treure bon joc i el qual seria entretingut estudiar-hi i treballar-hi. Al no saber-ne res sobre les piles de combustible vaig estar mirant-ne informació, i efectivament ho vaig trobar actual, útil i innovador, apte i encertat per un treball com aquest.

També vaig tenir en compte els experiments del laboratori, que potser serien diferents, dins d'un camp en el que no estic acostumada a moure'm i fou una cosa que m'atragué, trobava interessant treballar sobre territori desconegut.

Sempre he opinat que ja s'han de començar a plantejar alternatives a recursos no renovables i contaminants com el petroli, i al veure per damunt l'avanç que es portava amb les piles de combustible vaig trobar que seria bo informar-me del tema i veure les múltiples aplicacions quotidianes i favorables pel medi ambient que en podien sortir del seu ús.

## Agraïments

Desitjaria agrair la gran col·laboració, dedicació, suport i aportació en aquest treball de la meva tutora, ja que per ella ha estat possible la realització d'una investigació dins d'un món desconegut.

També la desinteressada disponibilitat i ajuda que han ofert totes les empreses i persones contactades al llarg de la recerca, que s'han mostrat oberts a qualsevol pregunta i animaven a tirar endavant el projecte. Entre elles es troben persones de la parròquia de St. Pau, un punt de referència en la meva vida.

No em voldria deixar de mencionar la meva família, que ha aportat una entrega i recolzament necessaris per avançar i poder perfeccionar el treball. Estant quan cal i quan no.

<b>Índex</b>	<b>Pàgina</b>
<b>1. Objectius</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Introducció</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1. L'electròlisi de l'aigua</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1.1. Introducció</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1.2. El procés</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1.3. Voltàmetre de Hoffman</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2. La pila de combustible</b> .....	<b>6-19</b>
<b>2.2.1. Una mica d'història</b> .....	<b>6-7</b>
<b>2.2.2. Què és?</b> .....	<b>7-9</b>
<b>2.2.2.1. Elements bàsics</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2.2.2. Funcionament</b> .....	<b>8-9</b>
<b>2.2.3. Aspectes importants en el disseny d'una pila</b> .....	<b>9-11</b>
<b>2.2.3.1. Cost</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2.3.2. El Voltatge</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2.3.3. Materials</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2.3.4. Altres</b> .....	<b>10-11</b>
<b>2.2.4. Classificació de les piles de combustible</b> .....	<b>11-13</b>
<b>2.2.4.1. Les piles alcalines</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2.4.2. Taula resum dels tipus de piles més conegudes</b> .....	<b>12</b>
<b>2.2.4.3. Les piles reversibles</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.5. En l'actualitat...</b> .....	<b>13-19</b>
<b>2.2.5.1. Avantatges i inconvenients de l'ús de les piles de combustible</b> .....	<b>13-15</b>
<b>2.2.5.2. Aplicacions</b> .....	<b>15-18</b>
<b>2.2.5.3. Previsions de la UE sobre la implantació de les piles de combustible a Europa</b> .....	<b>19</b>
<b>3. Metodologia</b> .....	<b>20-25</b>
<b>3.1. Recerca d'informació</b> .....	<b>20</b>
<b>3.2. Material necessari per fer les pràctiques</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3. Visita a uns laboratoris o una empresa</b> .....	<b>21</b>
<b>3.4. Cursos d'energies renovables</b> .....	<b>21</b>

<b>3.5. Kit pila de combustible .....</b>	<b>22</b>
<b>3.5.1. Cotxe H<sub>2</sub>.....</b>	<b>22</b>
<b>3.6. Pràctiques al laboratori.....</b>	<b>23-25</b>
<b>3.6.1. Electròlisi de l'aigua amb diverses solucions 1M .....</b>	<b>23-24</b>
<b>3.6.2. Pila combustible: hidrogen-oxigen .....</b>	<b>24</b>
<b>3.6.3. Combinacions d'elèctrodes .....</b>	<b>24-25</b>
<b>4. Resultats.....</b>	<b>26-42</b>
<b>4.1. Pràctica 3.1.1. <i>Electròlisi</i>.....</b>	<b>26-27</b>
<b>4.2. Pràctica 3.1.2. <i>Pila de combustible</i> .....</b>	<b>27-39</b>
<b>4.2.1. Voltatges amb diferents elèctrodes .....</b>	<b>28-31</b>
<b>4.2.1.1. Electròlit: NaOH .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2.1.2. Electròlit: HCl .....</b>	<b>29</b>
<b>4.2.1.3. Electròlit: KOH .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2.1.4. Electròlit: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.2. Voltatges amb diferents electròlits .....</b>	<b>32-35</b>
<b>4.2.2.1. Platí .....</b>	<b>32</b>
<b>4.2.2.2. Carbó .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2.2.3. Níquel.....</b>	<b>34</b>
<b>4.2.2.4. Zinc .....</b>	<b>35</b>
<b>4.2.3. Voltatges amb diferents temperatures .....</b>	<b>36-39</b>
<b>4.2.3.1. Electròlit: NaOH .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2.3.2. Electròlit: HCl .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2.3.3. Electròlit: KOH .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2.3.4. Electròlit: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.....</b>	<b>39</b>
<b>4.3. Pràctica 3.1.3. <i>Combinació d'elèctrodes</i> .....</b>	<b>40-42</b>
<b>4.4. Comprovació de piles històriques i del mercat .....</b>	<b>42</b>
<b>4.4.1.1. Pila àcid fosfòric: elèctrodes Pt o C</b> <b>i electròlit àcid fosfòric.....</b>	<b>42</b>
<b>4.4.1.2. Pila Bacon i alcalina: elèctrodes Ni</b> <b>i electròlit KOH (85%) .....</b>	<b>42</b>
<b>4.4.1.3. Pila Grove: elèctrodes Pt i</b> <b>electròlit H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> .....</b>	<b>42</b>

<b>5. Conclusions .....</b>	<b>43-47</b>
<b>5.1. Conclusions de les pràctiques .....</b>	<b>43-45</b>
<b>5.1.1. Pràctica 3.2.1. <i>Electròlisi</i>.....</b>	<b>43</b>
<b>5.1.2. Pràctica 3.2.2. <i>Pila combustible</i> .....</b>	<b>43-44</b>
<b>5.1.3. Pràctica 3.2.3. <i>Combinacions d'elèctrodes</i> .....</b>	<b>44-45</b>
<b>5.2. Resolució d'objectius.....</b>	<b>45-47</b>
<b>6. Valoració personal .....</b>	<b>48</b>
<b>7. Bibliografia.....</b>	<b>49-50</b>
<b>7.1. Llibres.....</b>	<b>49</b>
<b>7.2. Webs .....</b>	<b>49-50</b>

## 1. Objectius

Les piles de combustible podrien reemplaçar els motors de combustió interna en cotxes, autobusos, camions, embarcacions i locomotores. Alguns d'ells ja es troben funcionant amb aquest sistema o ho pretenen fer en un futur pròxim.

L'hidrogen està en camí de convertir-se en el següent combustible, reemplaçant el petroli. No és tòxic, renovable, net i l'element més abundant de l'univers. Utilitzant la tecnologia de les cel·les de combustibles, l'hidrogen es converteix en electricitat sense combustió alguna. Les piles de combustible podrien donar potència a l'automòbil perfecte del futur, net, silenciós, més eficient que el de gasolina, i amb menys temps de recàrrega que els motors elèctrics convencionals. Els beneficis encara serien més extraordinaris en termes d'assegurar l'energia i crearia nous llocs de treball.

Una solució significant a molts problemes del medi ambient. Centenars de companyies de tot el món estan treballant en les cel·les de combustible, la clau per la següent generació de producció d'energia.

L'objectiu principal d'aquest treball és aprofundir en l'estudi i les aplicacions de les piles de combustible.

Concretament, els objectius plantejats són:

- Estudiar el funcionament d'una pila de combustible
- Classificar els diferents tipus de piles
- Experimentar amb diverses piles de combustible
- Estudiar els diferents factors que afecten al funcionament de les piles
- Esbrinar les condicions per obtenir una pila òptima
- Determinar les seves aplicacions
- Experimentar amb una cel·la de combustible real
- Valorar l'estat de les piles de combustible al mercat
- Analitzar l'estat actual dels recursos energètics
- Presentar un futur amb piles de combustible

## 2. Introducció

### 2.1. L'electròlisi de l'aigua

#### 2.1.1. Introducció

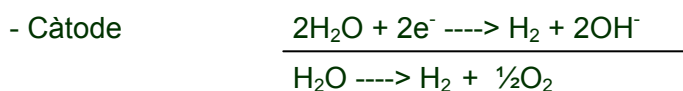
L'electròlisi és un mètode de separació dels elements que formen un compost aplicant-hi electricitat. L'origen de la mateixa paraula fa referència a la definició: "electro" d'electricitat i "lisis", que significa ruptura.

Aquest fenomen va ser descobert per Michael Faraday, un físic anglès, l'any 1820. En aquest es produeix una reacció d'oxidació-reducció i hi intervenen doncs, junt amb l'energia proporcionada pel corrent continu, dos elements bàsics: l'electròlit i els elèctrodes (ànode<sup>(+)</sup> i càtode<sup>(-)</sup>).

#### 2.1.2. El procés

L'electròlit<sup>1</sup> es dissol en un determinat dissolvent, l'aigua, per a que es separi en ions (àtoms carregats positiva o negativament). Es submergeixen parcialment en la solució els dos elèctrodes i per l'altre extrem es connecten al corrent. Cadascun atrau els ions de la càrrega contrària a la del corrent que el recorre. En els elèctrodes es produeix una transferència d'electrons entre ells mateixos i els ions atrets: els anions (ions negatius) a l'ànode i els cations (ions positius) al càtode; produint noves substàncies: oxigen i hidrogen respectivament.

Aquestes reaccions esmentades es poden recollir en les següents fórmules:



#### 2.1.3. Voltàmetre de Hoffman

El voltàmetre de Hoffman és un aparell que permet realitzar una electròlisi emmagatzemant els gasos resultants i mesurant-ne el volum obtingut.

Consta de dues provetes graduades de forma invertida, amb claus unides entre elles per un tub de seguretat comú. A l'extrem inferior de cada bureta s'ajusta l'elèctrode a l'agafador i aquest es pot connectar a la corrent per l'extrem que surt de l'aparell. Només fa falta connectar els dos elèctrodes al corrent i pot començar el procés.

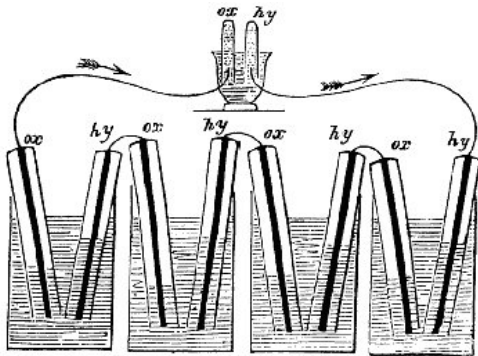


---

<sup>1</sup> Electròlit: Solució de sals que dóna lloc a la formació d'ions i permeten que l'energia elèctrica passi a través d'ells.

## 2.2. La pila de combustible

### 2.2.1. Una mica d'història

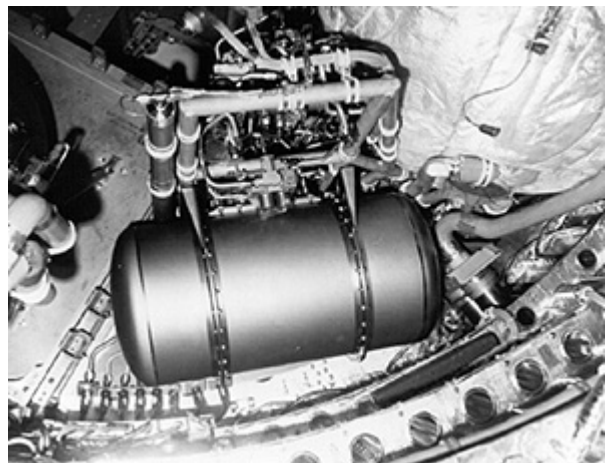


Els primers experiments més coneguts sobre les piles de combustible foren realitzats al 1842 pel físic i advocat anglès, Sr. William R. Grove (1881-1896). Connectant un ànode d'hidrogen i un càtode d'oxigen va produir un corrent elèctric com es mostra a la imatge de l'esquerra. Grove fou el primer en construir una pila de combustible efectiva, però va ser un científic alemany, Christian Friedrich Schoenbein

(1799-1868), qui va descobrir l'efecte generador d'electricitat de les piles de combustible. Ja al gener de 1839 va informar sobre el corrent produït mitjançant la combinació de l'hidrogen i l'oxigen. Grove va treballar al mateix temps sobre aquest fenomen i intercanviaren idees i descobriments durant els següents anys. Mentre que Schoenbein es centrà més en la part fonamental, Grove fou l'enginyer.

La primera pila presentada per Grove consistia en deu cel·les en sèrie i s'alimentava amb l'hidrogen procedent de la corrosió de zinc en àcid. Però per desgràcia, els seus avanços van topar-se amb la creació de la dinamo per Werner von Siemens, que feu ombra als seus brillants descobriments. Tot i això, Wilhelm Ostwald, premi Nobel, digué al 1884 que *"la pila de combustible és una gran invenció per la civilització, més que la màquina de vapor, i col·locarà aviat el generador de Siemens als museus"*. Al 1905, ell mateix i Nernst van presentar una teoria general sobre les piles de combustible.

Degut a la invenció del motor de combustió interna i la fàcil accessibilitat i gran quantitat de petroli, les piles foren oblidades fins a mitjans del segle XX. Fins que van ser rescatades amb el programa espacial Apol·lo dels Estats Units, durant els anys seixanta. El 21 d'agost de 1965, el Géminis 5 fou la primera llançadora espacial en usar una pila de combustible de membrana polimèrica (PEM) per reemplaçar la bateria. Degut a millors prestacions, les piles alcalines foren desenvolupades en les missions Apol·lo i proporcionaren potència elèctrica en el primer viatge tripulat a la Lluna al 1969.



El seu desenvolupament s'alentí per la por que transmet l'hidrogen, extremadament explosiu i per tant perillós. Aquest temor s'estengué pel conegut accident del zèppelin

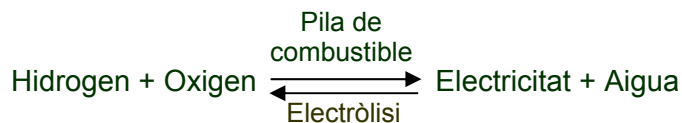
“Hindeburg” l’any 1937, però més tard es descobrí que no fou per una explosió d’hidrogen, sinó per la pintura explosiva, combinació d’alumini i ferro. A més, contrari a la majoria de compostos, és més lleuger que l’aire, de manera que quan succeeix una fuga es dispersa ràpidament i no forma mescla explosiva; no és tòxic i és menys inflamable que la gasolina.

La primera crisi del petroli al 1973 va permetre un segon impuls en el creixement de les piles de combustible, centrant l’interès en grans plantes basades en les piles d’alta temperatura. El professor Karl Kordesch de la Universitat de Graz, Àustria, fou un dels pioners en el camp d’aquestes piles. Juntament amb els seus col·laboradors va desenvolupar durant els setanta una motocicleta i un cotxe propulsats per una pila de combustible alcalina.

Les dues dècades següents es caracteritzaren per una preocupació per la contaminació mundial i buscar tecnologies energètiques netes, així que les piles experimentaren major atenció per part de governs i indústries fins els nostres dies. Les emissions de CO<sub>2</sub> i la seva influència en l’escalfament global ha obligat a la indústria automobilística a buscar alternatives per reemplaçar els motors de combustió interna. Cada any es gasten alguns bilions de dòlars en investigació i desenvolupament. Tot i haver-se presentat prototips per tot tipus d’aplicacions amb objectiu de demostrar la viabilitat tecnològica i econòmica, encara els queda un llarg camí per recórrer fins poder entrar al mercat habitual.

### 2.2.2. Què és?

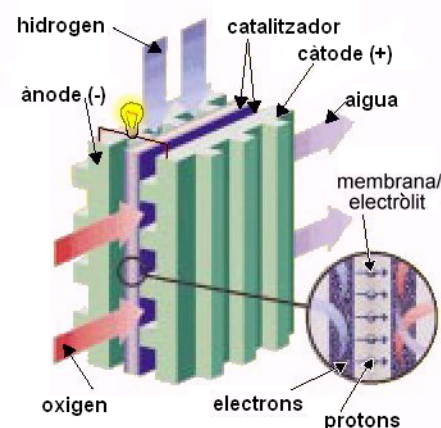
Una pila de combustible pot definir-se com un mecanisme electroquímic en el qual l’energia química emmagatzemada per un combustible es converteix directament en electricitat. El seu principi de funcionament és invers a l’electròlisi de l’aigua. És a dir, en l’electròlisi de l’aigua, es separa el compost en dos components, hidrogen i oxigen, mitjançant l’actuació de l’electricitat; mentre que en una pila de combustible s’obté corrent elèctrica a partir de la reacció entre aquests dos gasos:



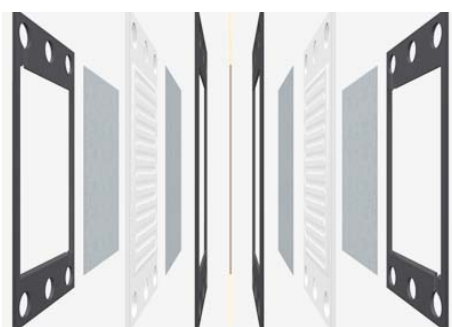
A diferència de la pila elèctrica o bateria comú, una pila de combustible no s’acaba; funcionarà mentre el combustible i l’oxidant li siguin subministrats des de fora de la pila, com si fos un motor: mentre se li afegeixi electricitat aquest no deixarà de funcionar. Aquest gran combustible que permet la seva existència és l’hidrogen, un dels elements més abundants i menys valorat, ja que té un gran poder energètic. Per veure més informació d’aquest, consultar l’*annex I* on s’expliquen les diverses formes d’obtenció d’hidrogen i altres aspectes interessants de l’element.

### 2.2.2.1. Elements bàsics

Els elements bàsics d'una cel·la de combustible són els elèctrodes, el càtode (pol positiu), l'ànode (pol negatiu); l'electròlit, que és la substància encarregada de transportar els ions produïts en les reaccions de reducció i oxidació; la matriu, que conté l'electròlit (que no és necessària quan aquest és sòlid); i la placa bipolar, que actua com a col·lectora de corrent i distribuïdora de gas. Algunes disposen de catalitzadors<sup>1</sup> per augmentar el rendiment de la cel·la.



Els conceptes de pila i cel·la de combustible sovint es confonen o es prenen per iguals; la veritat és que una cel·la de combustible, per si mateixa, només podria generar voltatges elèctrics d'1,2 volts aproximadament. És per això que pel seu ús en vehicles i altres que requereixin més potència s'apilen connectant-les en sèrie creant així les piles de combustible.



Components cel·la

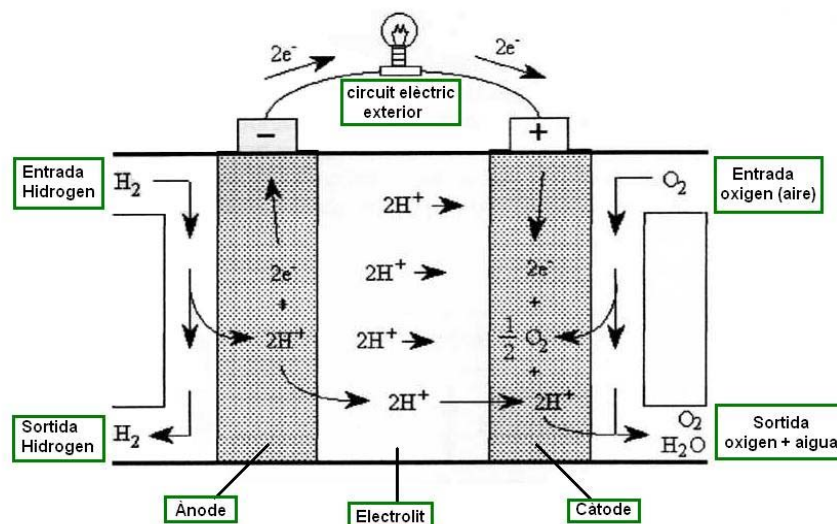


Pila de combustible

### 2.2.2.2. Funcionament

Una pila de combustible és un generador electroquímic que produeix energia elèctrica directament a partir de la reacció química entre un combustible hidrogen i l'oxigen de l'aire. En l'ànode es duu a terme la reacció d'oxidació del combustible, generant electrons i protons. Els protons formats són transportats per difusió cap al càtode a través de l'electròlit, mentre que els electrons emprenen el circuit extern al qual va connectat la pila. En el càtode es desenvolupa la reacció de reducció de l'oxigen de l'aire amb els electrons i protons produïts per l'ànode, formant molècules d'aigua. L'electròlit és el mitjà de transport dels protons d'un elèctrode a l'altre i serveix de separador entre els dos tipus de reactius.

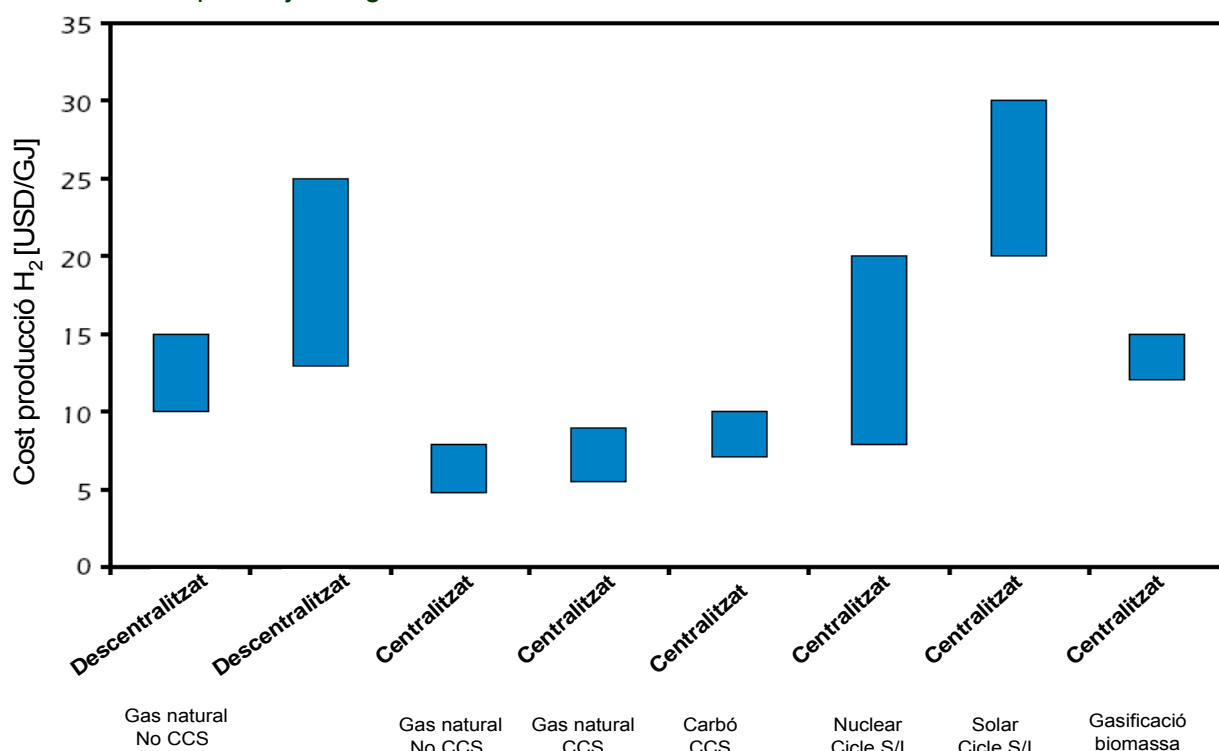
<sup>1</sup> Catalitzador: substància que intervé, romanent intacta, en una reacció química modificant la velocitat d'aquesta.



### 2.2.3. Aspectes importants en el disseny d'una pila

#### 2.2.3.1. Cost

El cost de les piles de combustible és un dels principals impediments que es troben a l'hora d'intentar comercialitzar-les a gran escala. Al ser tecnologies encara en fase d'investigació és molt difícil aconseguir preus assequibles per el consum quotidià. És per això que una de les màximes prioritats en la seva investigació és la recerca de materials alternatius igual d'eficients però més rentables. A més, un dels altres causants de la variació del seu preu en un futur és la forma d'obtenció del combustible, l'hidrogen. Tot i que les piles proven de ser un bé no contaminant i que pot acabar amb l'explotació de certs recursos, els resultats del següent gràfic demostren que la forma menys costosa d'obtenir l'hidrogen a hores d'ara és per mitjà del gas natural.



### 2.2.3.2. El Voltatge

Una cel·la de combustible típica produeix uns voltatges massa petits per a que pugui ser útil en aparells de potència major. Per crear més voltatge les cel·les s'agrupen combinant-les en sèrie o en paral·lel en un sistema que s'anomena Fuel Cell Stack, és a dir, apilat de cel·les de combustible. El nombre de cel·les és generalment superior a 45 i varia segons el disseny.

### 2.2.3.3. Materials

Els materials emprats en cel·les de combustible varien segons el tipus. Les plaques de l'elèctrode bipolar es fan generalment de metall, de níquel o amb nanotubs de carboni, per exemple. Aquestes són recobertes per un catalitzador, de platí o paladí, per aconseguir una eficàcia més alta. L'electròlit pot ser de ceràmica, líquid o bé una membrana.

### 2.2.3.4. Altres

Gestió de l'aigua: en alguns tipus de cel·les la membrana ha d'hidratar-se, requerint evaporar l'aigua exactament en la mateixa mesura que aquesta és produïda. Si ho fa massa ràpid, la membrana s'asseca, fent augmentar la resistència a través d'ella, conseqüentment s'esquerdarà i s'acabarà generant calor que danyarà la cel·la. I si pel contrari, ho fa massa lentament, els elèctrodes s'inundaran, evitant que els reactius puguin arribar al catalitzador i s'aturarà la reacció.

Gestió de la temperatura: S'ha de mantenir en tota la cel·la la mateixa temperatura per tal d'evitar la destrucció per esgotament tèrmic.

Control de flux: al funcionar com un motor convencional, es necessita una continuïtat en el quocient entre el reactiu i l'oxigen per tal de que la cel·la funcioni eficientment.

Temps de vida: la durabilitat d'una pila de combustible és un dels aspectes que es procuren millorar i està en continua investigació. És una de les conseqüències més directes a tots els problemes i manteniments plantejats, la temperatura, les substàncies nocives, els materials, preus... Aquesta condiona la qualitat d'una pila en tots els possibles aspectes.

Eficiència: la seva eficiència és molt elevada. Al no perdre gairebé energia en forma de calor, no els afecta el cicle de Carnot ja que no es produeix una reacció tèrmica, s'aprofita l'energia d'alta qualitat dels enllaços trencats i es transforma directament l'energia química en elèctrica. El Cicle de Carnot presenta la teoria d'una màquina perfecta a partir de l'aprofitament de la calor i la temperatura generades de tal manera que no es desaprofita energia per cap lloc i el rendiment de l'aparell és òptim. L'eficàcia d'una pila de combustible ( $\eta$ =rendiment), sota condicions estàndard<sup>1</sup> està limitada pel quocient de la variació de

---

<sup>1</sup> Condicions estàndard: pressió 1atm, temperatura 25°C (298°K), concentració 1M.

l'energia lliure de Gibbs  $\Delta G^\circ$  i per la variació de l'entalpia estàndard de la reacció química completa  $\Delta H^\circ$ .

$$\eta = \frac{\Delta G^\circ}{\Delta H^\circ} \times 100$$

Requisits especials: com la tolerància a certs gasos comuns, com el CO o el CO<sub>2</sub>.

### 2.2.4. Classificació de les piles de combustible

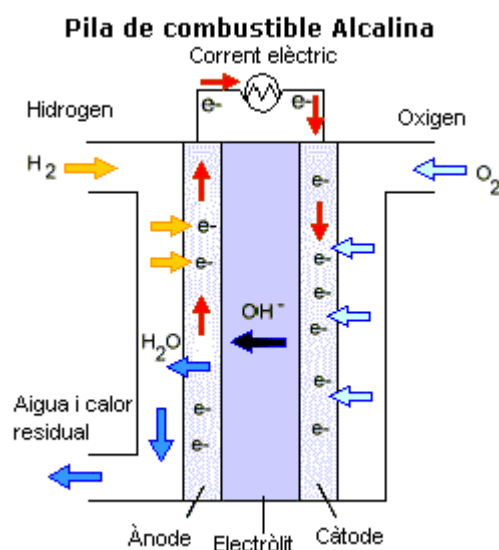
Les piles de combustible poden classificar-se atenent a molts diversos paràmetres: temperatura de treball, tipus d'electròlit, tipus de combustible i d'oxidant...El camp que ha predominat és l'electròlit utilitzat, que alhora condiona la temperatura d'operació. Seguint aquesta classificació es troben cinc tipus de pila principals i diferenciats, les piles de membrana polimèrica (PEMFC), les alcalines (AFC), les d'àcid fosfòric (PAFC), les de carbonats fosos (MCFC) i les d'òxids sòlids (SOFC). En aquest treball però, la pila més estudiada i la que s'ha comprovat al laboratori és l'alcalina; així que a continuació s'explicarà detalladament aquesta última i les altres en una taula resum (per més informació de les restants anar a l'*annex II*).

#### 2.2.4.1. Les piles alcalines

Aquestes piles foren de les primeres desenvolupades, i el primer tipus emprat de forma extensiva en el programa espacial d' Estats Units per produir energia elèctrica i aigua a bord de les naus espacials. Aquestes piles utilitzen una solució d'hidròxid de potassi en aigua com a electròlit i poden utilitzar varietat de metalls com a catalitzadors en l'ànode i el càtode. Poden funcionar temperatures de 100°C fins 250°C, però els dissenys més moderns permeten que ho facin entre 23°C i 70°C.

Les piles AFC són d'alt rendiment degut a la velocitat a la qual tenen lloc les reaccions que es produeixen en aquestes; també són molt eficients, adquirint 60% de rendiment en aplicacions espacials.

Una de les seves principals desavantatges és la seva gran sensibilitat a la contaminació per CO<sub>2</sub> que pot afectar el seu funcionament; és necessari purificar tant l'hidrogen com l'oxigen utilitzats. Aquest procés, conseqüentment incrementa el cost de la pila i la seva duració. Per això, llocs com l'espai i el fons del mar són idonis pel seu perfecte funcionament. Un dels obstacles més grans als quals s'enfronta aquest tipus de piles a partir del seu problema de fàcil contaminació per CO<sub>2</sub> és que necessiten superar les 40000 hores de funcionament, quan de moment només arriben a les 8000 hores.



### 2.2.4.2. Taula resum dels tipus de piles més conegudes

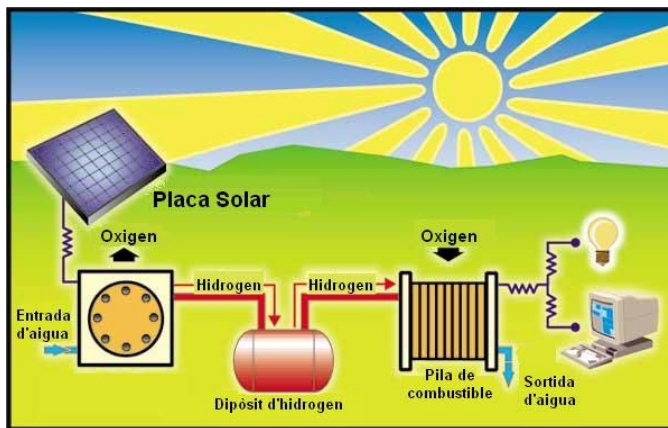
Tipus / Característica	Membrana polimèrica (PEMFC)	Alcalina (AFC)	Àcid fosfòric (PAFC)	Carbonats fosos (MCFC)	Òxids sòlids (SOFC)
Electròlit	Polímer sòlid	Solució aquosa d' KOH	Àcid fosfòric líquid	Solució líquida de liti, sodi i potassi	Òxid de Zr sòlid amb addició d'itri
Cond. iònic	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>=</sup>
Ànode	Pt/C	Ni	Pt/C	Ni	Ni-ZrO <sub>2</sub>
Càtode	Pt/C	Ag	Pt/C	NiO	LaMnO <sub>3</sub> /Sr
Temperatura d'operació	60-100°C	90-100°C	175-200°C	600-1000°C	600-1000°C
Subst. verí	CO, CH <sub>4</sub> , S(COS)	CO, S(COS), S(H <sub>2</sub> S)	CO, CH <sub>4</sub> , S(COS)	S(COS), S(H <sub>2</sub> S)	S(COS), S(H <sub>2</sub> S)
Combustible	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub>
Dissolvents	S(H <sub>2</sub> S)	CH <sub>4</sub>	S(H <sub>2</sub> S)	---	---
Potència sortida	5W-250kW	350W-5kW	200kW-1MW	1kW-100kW	10kW-2MW
Eficiència (%PCS)***	32-45	>50	36-45	43-55	43-55
Eficiència	70-80	70	40(85 amb cogeneració*)	60	60(85 amb cogeneració*)
Vida útil (h)	3000		30000	30000	40000
Aplicacions	Generació estacionària**, potència portàtil, transport	Espai (pioneres), militar, transport	Generació estacionària**, potència portàtil	Generació estacionària**	Generació estacionària**
Avantatges	L'electròlit sòlid redueix la corrosió i el manteniment Baixa temp., arranc ràpid	Reacció catòdica més ràpida, major eficiència.	85% eficiència de cogeneració d'electricitat i calor, accepta H <sub>2</sub> impur.	Major eficiència, catalitzadors més barats	Avantatges per alta temperatura i electròlit sòlid
Inconvenient	Alt cost catalitzadors, sensibles a impureses en H <sub>2</sub> i altres combustibles	Sensibles a impureses	Catalitzador de Pt (alt cost), baix corrent i potència, gran pes/volum	Corrosió per altes temperatures, baixa vida útil	Corrosió per altes temperatures, baixa vida útil
Reacció ànode	H <sub>2</sub> → 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> + 2(OH) <sup>-</sup> → 2H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> → 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> + CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> → H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> CO + CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> → 2CO <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> + O <sup>=</sup> → H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> CO + O <sup>=</sup> → 2CO <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> CH <sub>4</sub> + 4O <sup>=</sup> → 2H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub> + 8e <sup>-</sup>
Reacció càtode	1/2 O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> → 2(OH) <sup>-</sup>	1/2 O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> → 2(OH) <sup>-</sup>	1/2 O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> → 2(OH) <sup>-</sup>	1/2 O <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> → CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	1/2 O <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> → O <sup>=</sup>
Estat actual	Comercialitzant-se/Investigació				

\*Cogeneració: aprofitar la calor alliberada en una reacció d'una màquina per altres usos de manera que no es malgasta energia.

\*\* Generació d'energia en centrals elèctriques.

\*\*\* Poder calorífic superior, es la calor total que desprèn la reacció, incloent-hi la calor latent de la vaporització de l'aigua formada.

### 2.2.4.3. Les piles reversibles



Les piles de combustible reversibles produeixen electricitat a partir de l'hidrogen i l'oxigen, i generen calor i aigua com a productes sobrants, com les altres. La diferència està en que aquestes poden usar l'electricitat procedent de l'energia solar per tal de dividir l'excés d'aigua en combustible d'oxigen i hidrogen, electròlisi.

Aquest tipus de pila relativament nou està sent desenvolupat per la NASA i altres grups d'investigació.

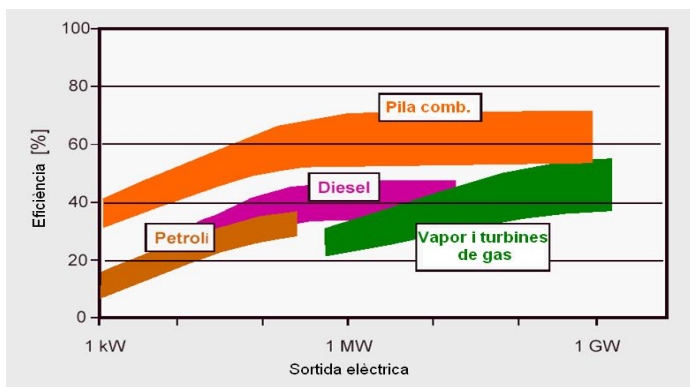
### 2.2.5. En l'actualitat...

En l'actualitat la barrera principal per a comercialitzar cel·les de combustibles és el seu cost de producció. Avui dia, el cost de fabricació de qualsevol sistema de cel·les de combustible és més alt que el d'equips equivalents amb tecnologia convencional.

#### 2.2.5.1. Avantatges i inconvenients de l'ús de piles de combustible

Les piles de combustible ofereixen una sèrie d'avantatges respecte els sistemes tradicionals de producció d'energia. Entre els més importants es poden remarcar:

- *L'alta eficiència energètica*: les piles de combustible no són màquines tèrmiques, podent-se aproximar teòricament al 100%.



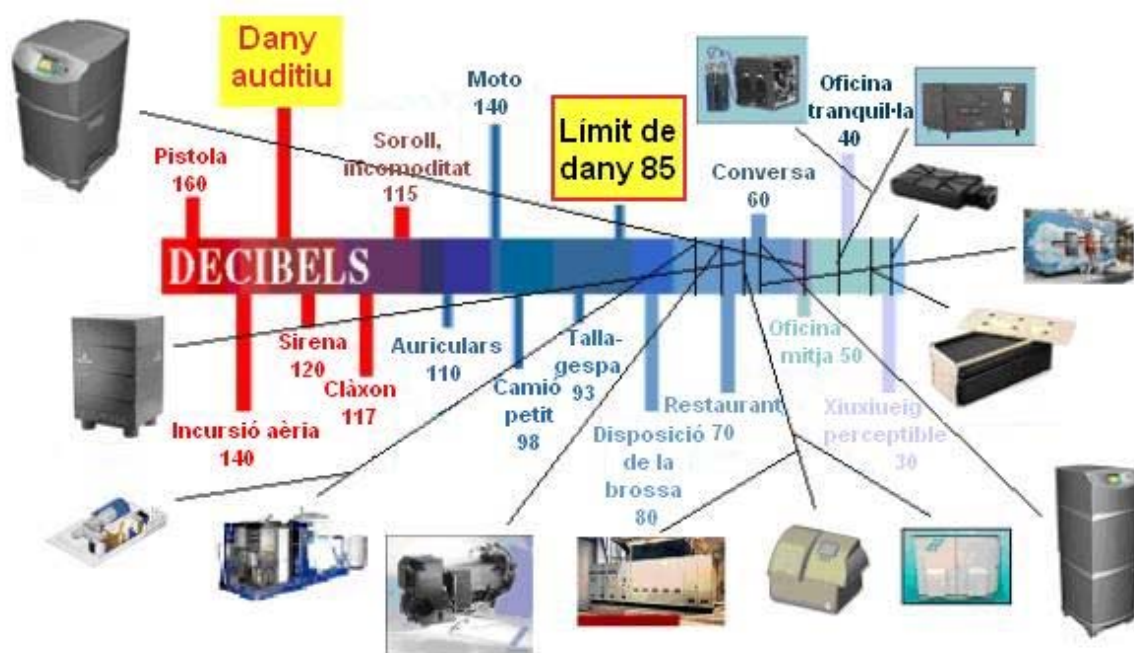
se aproximar teòricament al 100%. Només impedeixen arribar a aquest valor l'aprofitament de l'energia produïda i els materials emprats en la construcció. Comparant-la amb altres combustibles obtindríem els

resultats del gràfic.

- *Baix nivell de contaminació mediambiental*: al substituir la combustió a alta temperatura de combustibles fòssils per una reacció electroquímica catalitzada entre hidrogen i oxigen, no existeixen emissions de gasos contaminants, per el qual l'impacte sobre el medi ambient és mínim.

## Piles de combustible: un món per descobrir

- **Caràcter modular:** la disponibilitat de les piles de combustible com mòduls independents suposa un avantatge addicional, ja que un canvi d'escala en la potència necessitada s'aconsegueix fàcilment amb la interconnexió de mòduls.
- **Flexibilitat d'operació:** una pila de combustible pot funcionar a alt rendiment i sense interrupció en un ampli rang de potències subministrades. A més a més, poden realitzar-se variacions ràpides de potència
- **Admissió de diversos combustibles:** qualsevol combustible és apte per a ser reformat per tal de que inclogui hidrogen en la seva composició.
- **Baix impacte estètic:** al no existir tubs d'emissió de gasos ni torres de refrigeració, l'impacte visual d'una planta de producció d'energia basada en piles de combustible és mínim. S'ha arribat a proposar la seva integració en edificis residencials.
- **Fiabilitat:** els sistemes informàtics de control permeten automatitzar el funcionament d'una pila de combustible, sent mínima la intervenció manual requerida.
- **Senzillesa d'instal·lació:** les obres d'infraestructura són pràcticament innecessàries.
- **Funcionament silencios:** s'ha estimat que el nivell de soroll a 30 metres d'una pila de combustible de tamany mitjà és tan sols de 55decibels. Això suggereix, comparant les dades de la següent imatge, la poquíssima contaminació acústica que genera una pila de combustible.



Davant de tots aquests avantatges evidents, la utilització de piles de combustible com a font d'energia elèctrica presenta alguns inconvenients:

- **Tecnologia emergent:** determinats problemes encara no resolts afecten el funcionament de les piles de combustible, especialment el que es refereix a la seva vida útil, que afecta directament la seva possible comercialització.
- **Alt cost:** al tractar-se d'una tecnologia en desenvolupament i a l'existir encara una baixa demanda d'unitats, el preu no pot, avui en dia, competir al de les tecnologies convencionals. És d'esperar que, conforme la demanda augmenti, els preus es vagin equilibrant.
- **Sensibilitat cap als "verins" catalítics:** els elèctrodes emprats incorporen catalitzadors per afavorir al desenvolupament de les reaccions electroquímiques. El contacte d'aquestes substàncies amb els anomenats "verins" catalítics (monòxid de sofre o compostos de sofre), provoca la seva desactivació irreversible. En l'actualitat es treballa en la substitució d'aquests catalitzadors per materials més resistents.

### 2.2.5.2. Aplicacions

#### - Aparells electrònics de la vida quotidiana

Bateria de portàtil (Ballard)



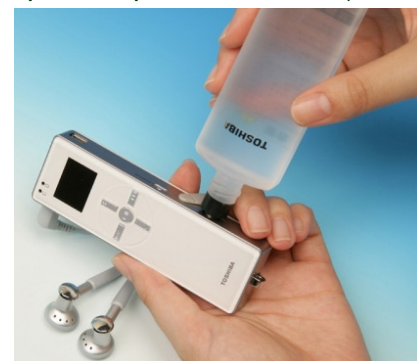
PDA amb cel·la de combustible (MTI)



Telèfon mòbil (motorola)

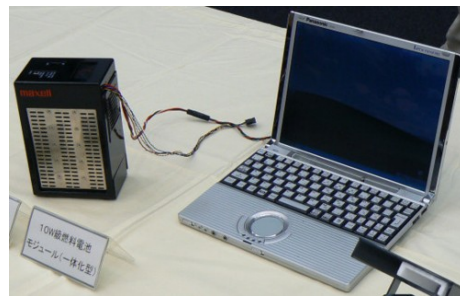


Mp3 amb pila de metanol (Toshiba)



**- Piles de combustible portàtils (per recàrregues)**

Voller VE-100



**- Transport amb piles de combustible**

Scooter (Aprilia)



Camioneta Coval H<sub>2</sub> T-1000



Cotxe Honda FCX-V3



Cotxe de bombers Peugeot APU



## Piles de combustible: un món per descobrir

---

Moto (ENV)



Autobús (Ballard)



Submarins (Type 212A)



Aviació (Boeing)



Elevadors



Trens



Embarcacions



- Piles de combustible estacionàries



- Aplicacions en missions espacials



- Telecomunicacions



- Plantes de tractament de les aigües



**2.2.5.3. Previsions de la UE pel 2020 sobre la implantació de les piles de combustible a Europa.**

	<b>Aplicacions per dispositius electrònics portàtils</b>	<b>Generadors portàtils i petits mercats</b>	<b>Aplicacions estacionàries per carretera</b>	<b>Aplicacions de transport</b>
<b>Unitats venudes per any</b>	~250 milions	~ 0'1 milions	0.1 a 0.2 milions	0.4 a 1.8 milions
<b>Ventes acumulades</b>	---	~0.6 milions	0.4 a 0.8 milions	---
<b>Situació en el mercat</b>	Establerta	Establerta	En creixement	Mercat en massa
<b>Potència mitjana</b>	15W	10kW	3kW (micro) 350kW (industrial)	---
<b>Cost</b>	1-2 €/W	500€/kW	2000 €/kW (micro) 1000 a 1500€/kW (industrial)	< 100€/kW

*Nota: per obtenir més informació de les piles de combustible i el món que les envolta dirigir-se a l'annex III.*

### 3. Metodologia

#### 3.1. Recerca d'informació

Primer que tot, al ser un camp bastant desconegut, es va haver de fer una recerca d'informació i recursos tan àmplia com fos possible. Al tractar-se d'un element tecnològic relativament nou, el primer lloc on es va recórrer fou Internet. Allí es trobaren moltíssimes empreses i associacions capdavanteres en la investigació de les piles de combustible i el seu futur viable. A més, es trobaren llibres a la universitat de químiques de Tarragona, guies senceres en anglès d'on se'n podria extreure informació.

#### 3.2. Material necessari per fer les pràctiques

A partir d'aquí, i al saber millor en què consistia el món del treball escollit començaren les pràctiques al laboratori proposades per la tutora del treball simulant una pila de combustible (veure 3.6. Pràctiques al laboratori). A l'haver-se de realitzar amb materials que no posseïa l'escola es posà en marxa una cadena de contactes i recerca contínua. El primer element a aconseguir fou el voltàmetre de Hoffman, indispensable al ser l'element principal de les pràctiques; però d'això se n'encarregà l'escola ja que els seria útil en un futur i per tant els anava bé comprar-ne un. Aquest, ja es va demanar amb dos elèctrodes, platí i carbó, i també part dels electròlits es podien fer amb el material del laboratori així que s'iniciaren els experiments.

Es presentà l'opció d'un nou elèctrode, el níquel, així que es visitaren totes les ferreteries i possibles tendes de la zona, però l'únic que es trobaren foren metalls banyats amb níquel, així que no interessava. Fins que, movent uns quans fils, amb l'ajuda del senyor Punyet, una de les fàbriques que soldaven de Repsol proporcionà níquel en fil, perfecte pels elèctrodes. Arran d'aquí es generà un nou problema, com fer encaixar el fil de níquel a l'extrem del voltàmetre, ja que era més estret del que tocava i llavors l'electròlit s'escolaria per l'extrem inferior fent impossible la reacció. Així que es buscaren plaques de silicona, o com s'havia fet amb els elèctrodes de carbó, més gruixuts, enrotllant etiquetes adhesives donant-hi voltes fins aconseguir el gruix necessari. Però no hi hagué manera. Fins que es provà travessant l'extrem d'un globus d'aigua amb el metall i retallant la part sobrant, de forma que el líquid no podria passar pels voltants.

Les pràctiques s'ampliaren afegint-hi un elèctrode, el zinc, i un electròlit, l'àcid fosfòric; però l'escola no en disposava en el laboratori. Així que es contactà amb la Repsol, els quals enviaren un litre de solució d'àcid fosfòric 1 M, la concentració requerida. Pel que fa al zinc, fou més difícil de trobar, ja que no s'hi treballava en fil per les rodalies, només amb plaques de soldadura i eren impossibles d'adaptar. Però s'acabà contactant amb una empresa de Vitòria, Descon Química, que enviaren fils de zinc des de la seva representada Zinacor S.A. de Bèlgica.

### 3.3. Visita a uns laboratoris o una empresa

Es plantejà també la possibilitat d'ampliar el treball amb la visita a uns laboratoris, així que s'enviaren tants correus com es pogueren a les empreses que es trobaren per Internet: APPICE, CIEMAT, Hynergreen, AeH<sub>2</sub>, Ajusa i Ariema. Les altres que es trobaren foren empreses angleses o que no disposaven d'atenció al client per poder-s'hi posar en contacte lliurement. De les anomenades, no amb totes es tingué la mateixa sort:

- APPICE. Poc després d'haver enviat la sol·licitud, amb un adjunt de l'índex i explicant les pràctiques que es realitzarien, contestaren obertament oferint una possible visita als seus laboratoris de Madrid. Fins i tots animaren a tirar endavant el projecte i proporcionaren, mitjançant l'ajuda d'un dels treballadors, Tomàs González, la direcció d'una de les col·laboradores de l'empresa de Barcelona, la Sra. Gemma García, per tal de fer més propera la visita si no era possible anar tant lluny.
  - CIEMAT. La mateixa presidenta de la companyia, Dra. Loreto Daza Bertrand contestà el correu molt amablement i aportà la direcció del Sr. Antonio Martínez Chaparro per poder consultar qualsevol dubte. També acolliren amb els braços oberts la possibilitat d'una visita, però les instal·lacions es trobaven massa lluny, a Madrid.
- Hynergreen. Aquesta empresa retornà el primer correu amb error, i es provaren altres direccions de la llista de contactes però no hi hagué resposta.
- AeH<sub>2</sub>. No hi hagué resposta de cap tipus.
- Ajusa. Contestaren també ràpidament, es posà en contacte el Sr. Carlos Velasco, que oferí també la possibilitat de realitzar una visita als seus laboratoris d'Albacete, i parlà de deixar provar l'Scooter que funcionava amb pila de combustible.

Però al final la visita fou exclosa del treball, per dificultats de moure's tan lluny i ja que per qüestions de confidencialitat no podien ensenyar els laboratoris ni les piles. No sortia rentable. A més es descartà la possibilitat de l'Autònoma de Barcelona ja que allí només s'hi treballava amb parts de piles i a més els límits de restricció es mantenien. Tot i això, seguiren en contacte per dubtes del treball.

### 3.4. Cursos d'energies renovables

Un dia es va rebre un correu de G-mail de publicitat oferint cursos d'energies renovables on s'hi anomenaven les piles de combustible, així que s'envià un correu amb les dades personals per poder-hi entrar en contacte. Trucaren i el senyor Manuel García informà sobre tot el que feien, però eren cursos d'empreses i les dates no eren favorables. Tot i això deixà el seu correu electrònic per mantenir-se obert a futures consultes via e-mail.

### 3.5. Kit pila de combustible

També es contactà amb l'empresa ARIEMA per tal de poder obtenir un kit didàctic d'una pila de combustible per poder-la manipular i fer-ho servir per la presentació i per ampliació del treball. A partir del catàleg se n'escolliren diverses, i se'n demanà informació. El primer correu fou contestat molt amablement per la Sta. Conchi García, que informà sobre els productes que se li havien consultat, però a l'enviar un segon i un tercer correu per acordar temps d'entrega i la demanda aquests no foren contestats. Així que també es descartà l'opció ja que no arribaria a temps i els preus no eren prou assequibles per l'ús que se n'extrauria del producte.

#### 3.5.1. Cotxe H<sub>2</sub>

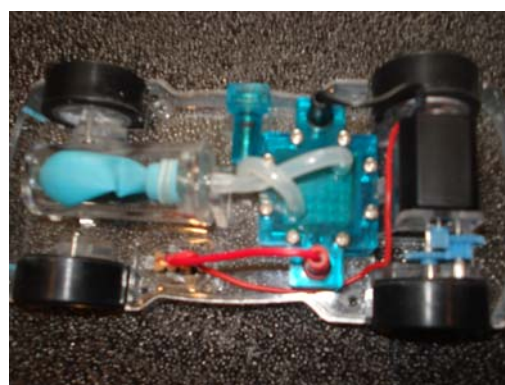
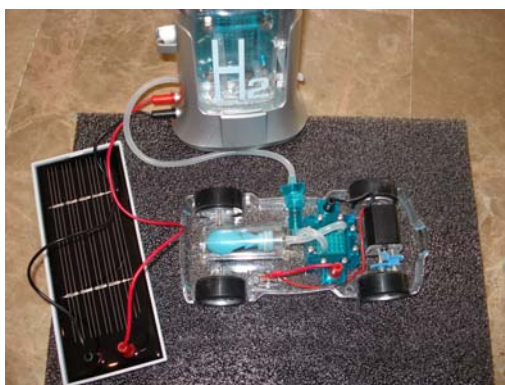
Finalment, per pura casualitat, es trobà en un catàleg de l'Imaginariumm, una empresa de joguines, un apartat d'ecologia relativament nou on s'hi anunciava un cotxe que funcionava amb pila de combustible. Ràpidament s'acudí a una de les botigues de la ciutat i s'obtingué el producte, H<sub>2</sub>



*Ecocar*, molt útil i rentable pel treball. El preu era econòmic, 125€, i no era una pila sola, sinó que portava un sistema de recàrrega i es trobava connectada a un cotxe de joguina per un motor elèctric. Fins i tot venia amb una placa solar per poder realitzar l'electròlisi de manera més neta. Però per qüestions de seguretat no s'obrí la pila, ja que es canviarien les condicions amb la que la fabricaren i segurament el seu funcionament empitjoraria. És més, a les instruccions, en un CD per no malgastar paper, recordava moltíssim les mesures de seguretat a l'hora d'operar amb l'aparell.

El que no constaven eren les característiques específiques del cotxe, així que en un principi es deduí que es tractava d'una pila PEM, ja que no acceptava impureses en el combustible i era la més utilitzada pels vehicles. Es va encertar, ja que es trobà una web amb tota la informació (veure *annex IV*).

Resulta bo i interessant que es comencin a introduir joguines i productes al mercat que entrin una mica en el nou món que s'obrirà en un futur cada vegada més pròxim.



### 3.6. Pràctiques al laboratori

Es realitzaren dues pràctiques en una per poder fer una simulació d'una pila de combustible. En aquestes es realitzà per una part l'electròlisi de diverses solucions a diferents temperatures i amb diversos elèctrodes, i per l'altra, aprofitant l'hidrogen generat, es desconnectà de la corrent i amb un voltímetre se'n mesurà el voltatge obtingut. A partir de, doncs, el principi bàsic de les piles de combustible: la seva reacció és l'electròlisi invertida.

Arran d'això se'n presentarà un anàlisi per separat per estudiar-ne les anomalies i treure'n uns resultats amb més enteniment.

#### 3.6.1. Electròlisi de l'aigua amb diverses solucions 1M

MATERIAL: voltàmetre de Hoffman's, elèctrodes, cables, pinces de cocodril, font d'alimentació continua (1-12 V), electròlits, aigua destil·lada, cronòmetre, amperímetre, resistència.



Voltàmetre de Hoffman's



Amperímetre



Pinces, cables i resistència

-Elèctrodes:



Platí



Zinc



Níquel



Carbó

-Electròlits: solucions amb aigua destil·lada d' $\text{KOH}$  1M, àcid fosfòric 1M,  $\text{NaOH}$  1 M,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1M, àcid acètic 1 M,  $\text{HCl}$  1M.

Preparació electròlits

- Després de realitzar els càlculs pertinents (veure *annex V*), s'introdueix la quantitat de solut en un matràs aforat de 250ml.
- S'omple fins enrasar el matràs amb aigua destil·lada mentre es remena la solució.

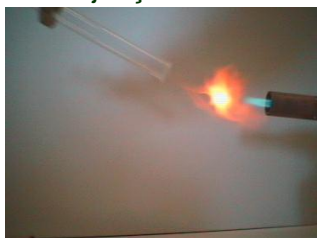
PROCEDIMENT:

- Es munta l'aparell de Hoffman's i s'omple amb una de les solucions 1 M, es connecten els elèctrodes a la font d'alimentació i es tanca el circuit procurant que la intensitat sigui d'1 A (però no s'aconsegueix, i ronda els 0'03A).
- Durant uns minuts es produeix l'electròlisi de l'aigua, cal identificar els gasos que s'obtenen en cada elèctrode: apropant un llumí encès l'hidrogen detona i l'oxigen

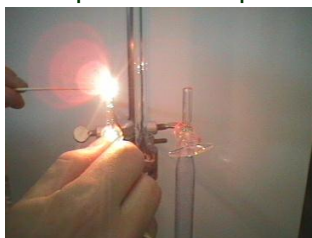
s'encén. També es pot mesurar el pH de cada elèctrode. Anotar el temps que es tarda en obtenir 30ml d'hidrogen.

### COMPROVACIÓ DE L'OXIGEN I L'HIDROGEN

- Mitjançant el sistema del llumí explicat en els procediments:



Reacció hidrogen



Reacció oxigen

- Si del trencament d'una molècula d'aigua s'obtenen dos àtoms d'hidrogen i un d'oxigen el volum del primer és el doble que el d'O<sub>2</sub>.
- L'hidrogen sempre es formarà a l'ànode, l'elèctrode amb pol negatiu, ja que aquest té càrrega positiva H<sup>+</sup>.

### 3.6.2. Pila combustible: hidrogen-oxigen

**MATERIAL:** voltàmetre de Hoffman's, elèctrodes, cables, pinces de cocodril, font d'alimentació continua (1-12 V), electròlits, aigua destil·lada, cronòmetre, amperímetre, resistència.

- Elèctrodes: platí, carbó, níquel i zinc
- Electròlits: solucions amb aigua destil·lada de KOH 1M, àcid fosfòric 1M, àcid sulfúric 1M, NaOH 1 M, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1M, àcid acètic 1 M, HCl 1M.

**PROCEDIMENT:**

- Continuant a partir de la pràctica 2.1.1. es desconnecta de la font d'alimentació i es connecta amb un voltímetre, mesurant la f.e.m. i el temps que triga a descarregar-se la pila.
- Es repeteix el procediment anterior canviant els elèctrodes (platí, níquel...), canviant els electròlits (àcid sulfúric 1M, sulfat de sodi 1M, àcid acètic 1 M, KOH 1 M...), i provant cadascuna de les combinacions anteriors en tres temperatures: ambient, 40°C i 60°C.



### 3.6.3. Combinacions d'elèctrodes

**MATERIAL:** voltàmetre de Hoffman's, elèctrodes, cables, pinces de cocodril, font d'alimentació continua (1-12 V), electròlits, aigua destil·lada, cronòmetre, amperímetre, resistència.

- **Elèctrodes:** platí, carbó, níquel i zinc
- **Electròlits:** solució amb aigua destil·lada de KOH 1M.

### PROCEDIMENT:

Es realitzen les pràctiques 3.1.1 i 3.1.2 com s'havien fet seguides, però canviant les possibilitats:

- L'electròlit KOH que representa una de les piles del mercat, l'alcalina.
- A tan sols una temperatura, l'ambient, ja que resultà la més estable i a més no es detectaven molts canvis d'una temperatura a una altra en part dels casos.
- En lloc de fer parelles d'elèctrodes iguals, es realitzaran totes les combinacions entre ells amb l'electròlit. A més, en cadascuna s'intercanviaran els papers entre ànode i càtode.
- Només se n'analitzarà el voltatge. L'electròlisi no fa falta perquè es presenten les mateixes anomalies que en les pràctiques anteriors.



## 4. Resultats

### 4.1. Pràctica 3.1.1. *Electròlisis*

Per observar els resultats obtinguts en les pràctiques d'electròlisi dirigir-se a l'annex VI, ja que només és una pràctica per obtenir el combustible per les piles de combustible que es proven. No hi consten la resta dels electròlits ja que no reaccionaren amb molaritat d'1M. S'escollí aquesta concentració perquè els càlculs requerien condicions estàndard per fer-se amb més precisió i facilitat.

*Notes: els gràfics són lineals ja que ha estat comprovat per diverses mesures que la reaccions són constants, encara que només consti la dada final. No es distingeixen les diferents temperatures perquè ens els tres casos es produïren les mateixes anomalies amb més o menys intensitat.*

Conseqüentment s'analitzaran les anomalies que succeïren en els experiments:

Elèctrolit	Elèctrode	Formació O <sub>2</sub>	Anomalies en el tub O <sub>2</sub>
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Platí	Meitat que d' H <sub>2</sub>	No hi ha anomalies
	Carbó	<b>No se'n forma</b>	<sup>1</sup> <b>El carbó s'ennegreix</b>
	Níquel	<b>No se'n forma</b>	<sup>2</sup> <b>Formació líquid groc</b>
	Zinc	<b>No se'n forma</b>	<sup>3</sup> <b>Canvi de sentit al treure el corrent</b>
<b>HCl</b>	Platí	<b>No se'n forma</b>	<sup>4</sup> <b>Formació líquid groc</b>
	Carbó	<b>No se'n forma</b>	<sup>5</sup> <b>Sense anomalies visibles</b>
	Níquel	<b>No se'n forma</b>	<sup>6</sup> <b>Formació líquid verd</b>
	Zinc	<b>No se'n forma</b>	<sup>7</sup> <b>Canvi de sentit al treure el corrent</b>
<b>KOH</b>	Platí	Meitat que d' H <sub>2</sub>	No hi ha anomalies
	Carbó	Meitat que d' H <sub>2</sub>	No hi ha anomalies
	Níquel	Meitat que d' H <sub>2</sub>	<sup>8</sup> <b>Formació capa negra sobre el Ni</b>
	Zinc	Meitat que d' H <sub>2</sub>	<sup>9</sup> <b>Formació capa negra sobre el Zn</b>
<b>NaOH</b>	Platí	Meitat que d' H <sub>2</sub>	No hi ha anomalies
	Carbó	Meitat que d' H <sub>2</sub>	No hi ha anomalies
	Níquel	Meitat que d' H <sub>2</sub>	No hi ha anomalies
	Zinc	<b>Gairebé gens</b>	<sup>10</sup> <b>Enfosquiment dels dos elèctrodes</b>

1. Carbó + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : S'ennegreix el carbó

Formació de precipitat de carbó

2. Níquel + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : Formació líquid groc i no es forma oxigen

Ni + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> → H<sub>2</sub> + **NiSO<sub>4</sub>** (té un color grogós)

3. Zinc + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : Formació de cristalls i canvi de sentit del corrent

Zn + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> → H<sub>2</sub> + **ZnSO<sub>4</sub>** (cristalls)

4. Platí + HCl : Formació líquid groc i no es forma oxigen



5. Carbó + HCl : Anomalies no visibles i no es forma oxigen



6. Níquel + HCl : Formació de líquid verd i no es forma oxigen



7. Zinc + HCl : Zinc de color blanc i canvi de sentit del corrent



8. Níquel + KOH : Níquel de color negre



9. Zinc +KOH : Zinc de color negre



10. Zinc + NaOH



#### 4.2. Pràctica 3.1.2. Pila de combustible

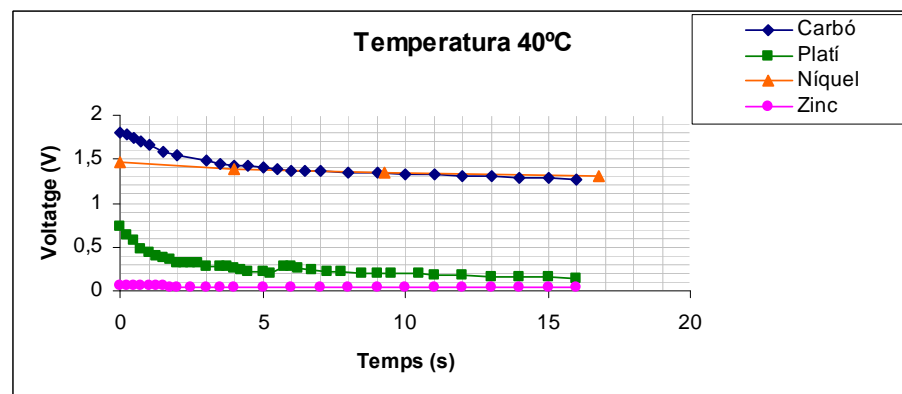
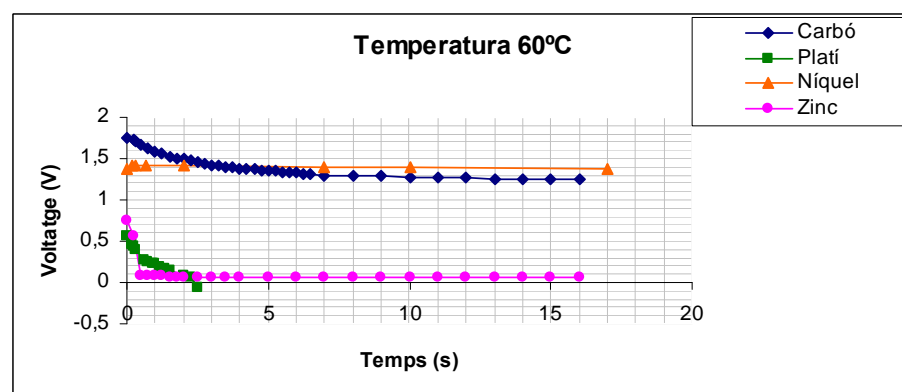
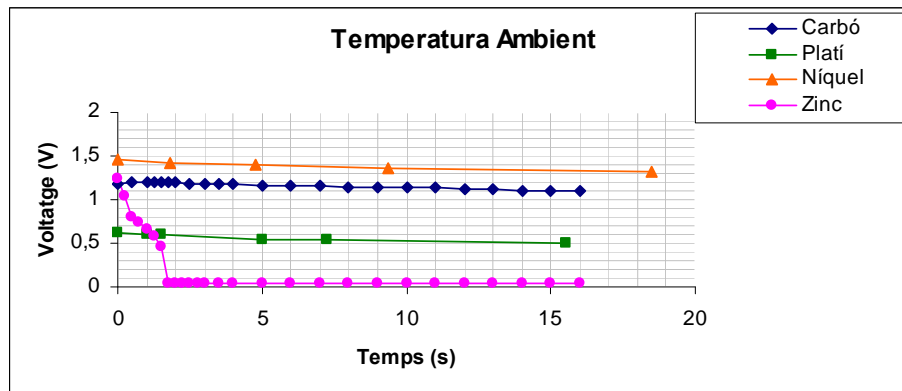
Tots els resultats obtinguts es troben organitzats en diversos gràfics per temperatures, per voltatges o per electròlits. Els intervals de temps són més reduïts al principi fins al minut quatre, ja que són els moments on més canvis es produeix en el voltatge, a partir d'allí normalment s'estabilitza. A més s'ha calculat el potencial redox<sup>1</sup> E° de cada reacció, com es mostra en la següent taula, per comparar-lo amb els resultats obtinguts en les pràctiques i amb el teòric d'una pila E°=1'229V (per veure els càlculs dirigir-se a l'annex VII). En aquesta taula es pot observar com les anomalies afecten negativament en la majoria dels casos als voltatges teòrics de les piles.

Electròlit	Elèctrode	Potencials estàndard (f.e.m.)	Electròlit	Elèctrode	Potencials estàndard (f.e.m.)
<b>NaOH</b>	Platí	$\Delta E^\circ = 1'23\text{V}$	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Platí	$\Delta E^\circ = 1'23\text{V}$
	Carbó	$\Delta E^\circ = 1'23\text{V}$		Carbó	$\Delta E^\circ = 1'23\text{V}$
	Níquel	$\Delta E^\circ = 1'23\text{V}$		Níquel	$\Delta E^\circ = 0'23\text{V}$
	Zinc	$\Delta E^\circ = 0'76\text{V}$		Zinc	$\Delta E^\circ = 0'76\text{V}$
<b>HCl</b>	Platí	$\Delta E^\circ = 1'2\text{V}$	<b>KOH</b>	Platí	$\Delta E^\circ = 1'23\text{V}$
	Carbó	$\Delta E^\circ = 0'13\text{V}$		Carbó	$\Delta E^\circ = 1'23\text{V}$
	Níquel	$\Delta E^\circ = 0'23\text{V}$		Níquel	$\Delta E^\circ = 1'188\text{V}$
	Zinc	$\Delta E^\circ = 0'76\text{V}$		Zinc	$\Delta E^\circ = 1'99\text{V}$

<sup>1</sup> Potencial redox: mesura expressada en volts que representa el valor quantitatiu que té una substància per oxidar-se o reduir-se durant una reacció.

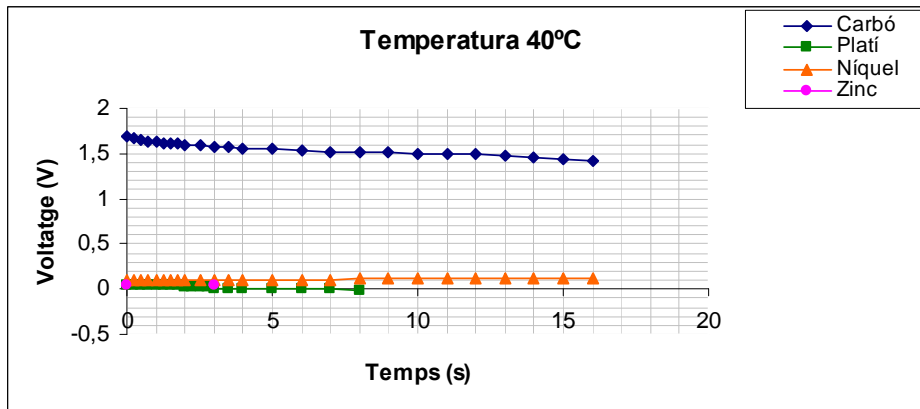
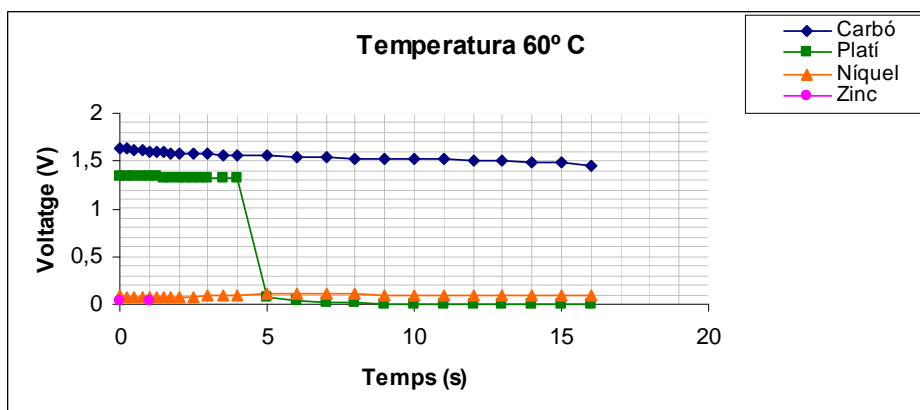
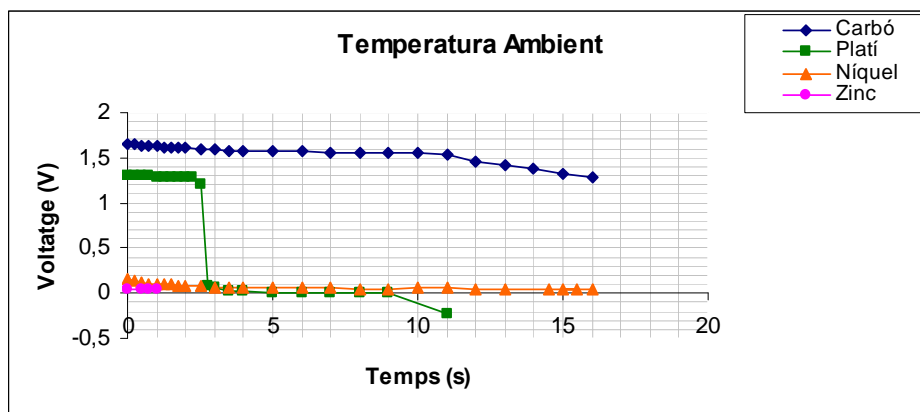
## 4.2.1. Voltatges amb diferents elèctrodes

### 4.2.1.1. Electròlit: NaOH



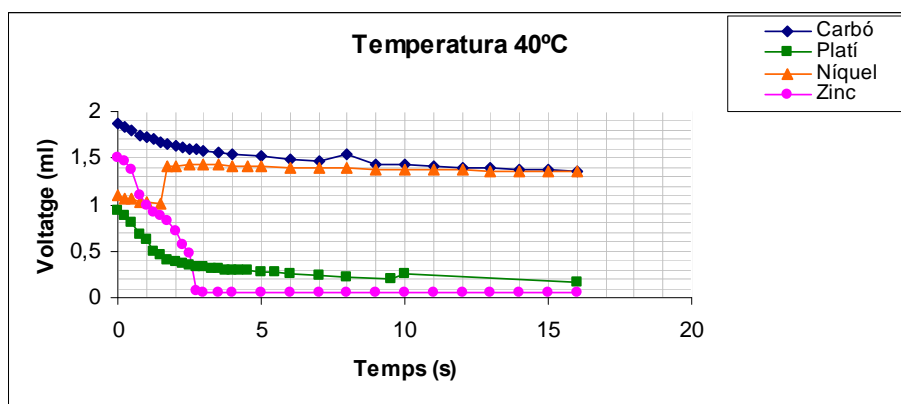
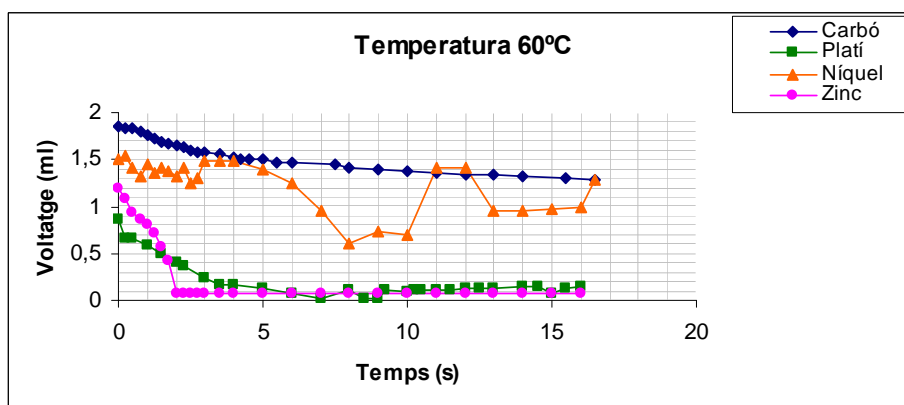
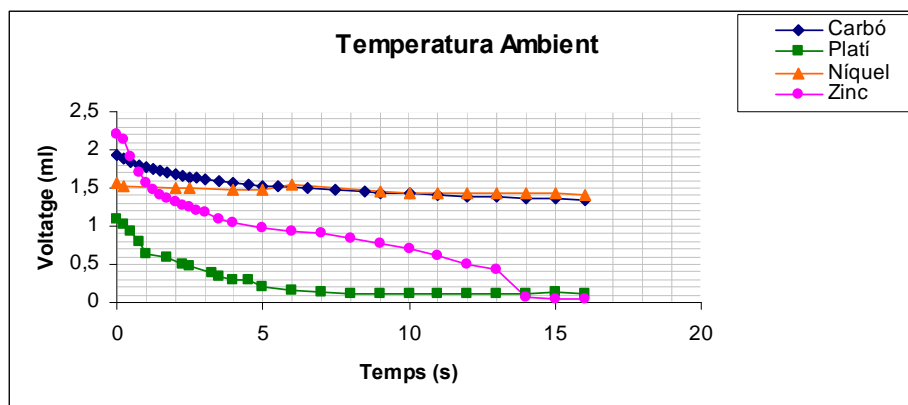
- A temperatura ambient, funcionen bé tots menys en zinc. El millor de tots és el níquel. Tots s'aproximen al voltatge calculat teòricament, tot i que el zinc i el platí se n'allunyen bastant més del valor establert i de manera negativa.
- Amb el canvi de temperatura el carbó millora força, el níquel es manté, el zinc no canvia el comportament i el platí si veu afectat i empitjora força.
- El millor elèctrode és el níquel ja que manté el comportament més estable en totes les temperatures; tot i que, de ben a prop en seguiria el carbó, que presenta unes condicions similars.
- El més afectat per la temperatura és el platí, que perd estabilitat al augmentar-la.

#### 4.2.1.2. Electròlit: HCl



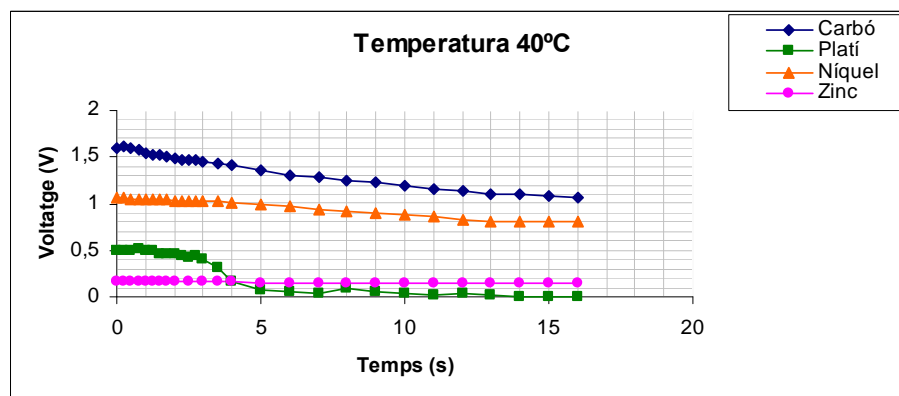
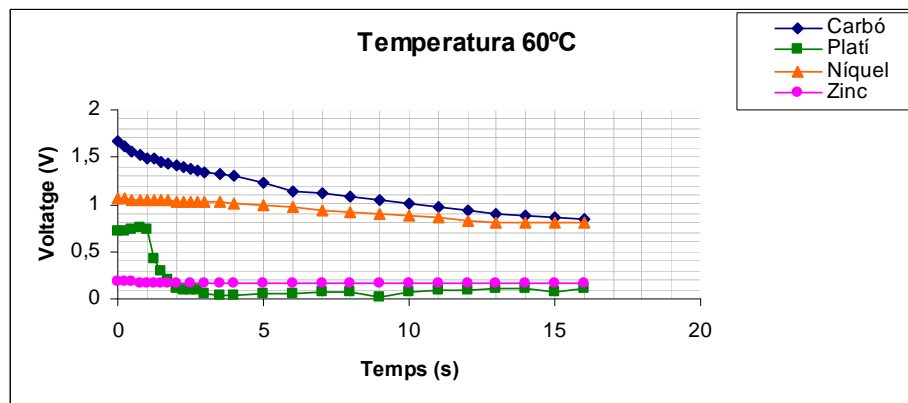
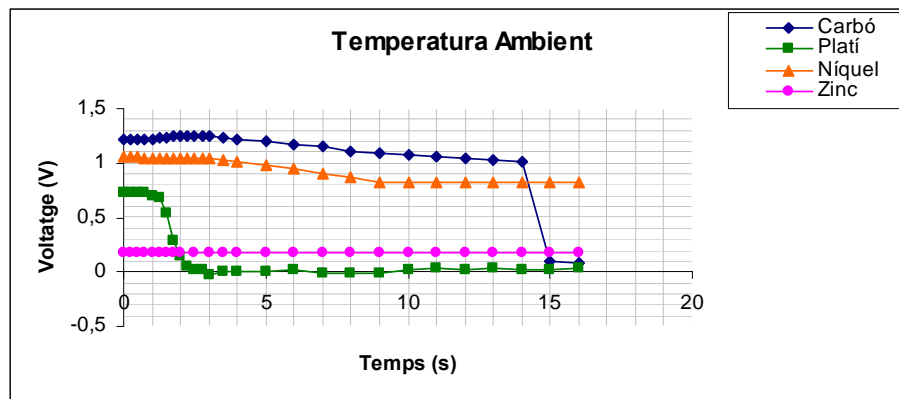
- A temperatura ambient el que funciona millor i amb diferència és el carbó, mantenint un voltatge estable i alt. El platí pateix un canvi brusc, tot i haver començat amb els mateixos volts que els teòrics. I els altres dos elèctrodes, com s'obté en els càlculs de f.e.m. no generen gairebé voltatge.
- La temperatura no afecta cap dels comportaments dels elèctrodes. Només remarcar els 40°C amb el platí que n'anul·la tota activitat.
- Amb claredat es pot deduir el millor, el carbó. Els dos pitjors serien el níquel i el zinc. El platí podria ser que canviés el seu comportament amb d'altres temperatures, ja que s'hi veu afectat.

### 4.2.1.3. Electròlit: KOH



- A temperatura ambient, els dos elèctrodes que funcionen millor són el níquel i el carbó, complint el voltatge teòric. El platí resulta incompatible amb aquest electròlit ja que no s'entén el seu comportament tan contrari a l'estipulat teòricament. El zinc, tot i presentar voltatges teòrics alts, la seva inestabilitat i baixada són considerables.
- Amb el canvi de temperatura l'únic elèctrode afectat, i de manera negativa, és el níquel, que tot i trobar-se en alts voltatges perd tota mena d'estabilitat. Prefereix temperatures reduïdes; se'n pot extreure aquesta conclusió ja que quan es canvia a 40°C s'estabilitza amb el temps, durant el qual l'electròlit s'ha refredat i a rebaixat la seva temperatura.
- El millor de tots és el carbó, que es mostra estable en totes les temperatures.

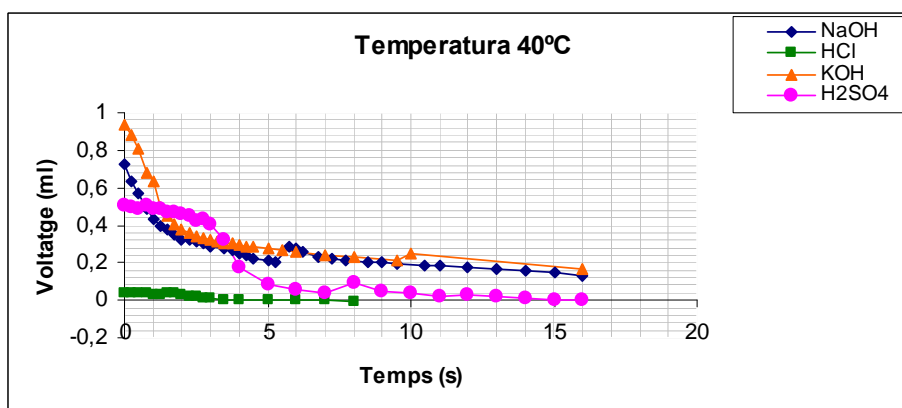
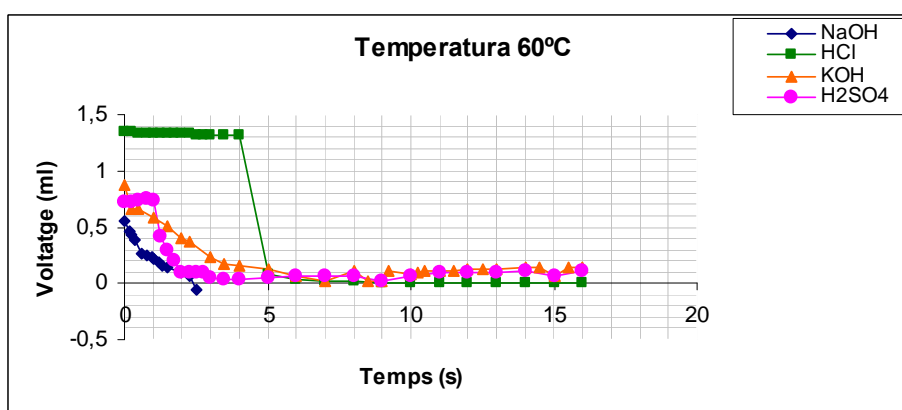
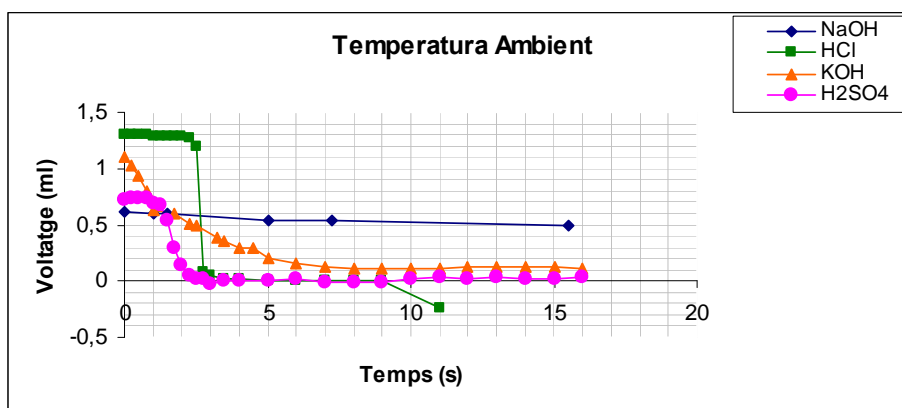
#### 4.2.1.4. Electròlit: $H_2SO_4$



- A temperatura ambient el níquel resulta el més estable generant molt més voltatge del calculat teòricament; formar  $NiSO_4$  en la reacció no afecta el seu comportament experimental. El carbó comença bé i igualant el voltatge calculat, però s'inestabilitza amb el pas del temps. Els altres dos elèctrodes, platí i zinc són els pitjors per aquest electròlit; el platí per incompatibilitat i el zinc per la formació de  $ZnSO_4$ .
- Amb el canvi de temperatura només es produeix un canvi, el del carbó, que suavitza la seva baixada de voltatge. En millora els resultats.
- El millor per treballar amb aquest electròlit és el níquel, mantenint un bon voltatge en totes les temperatures.

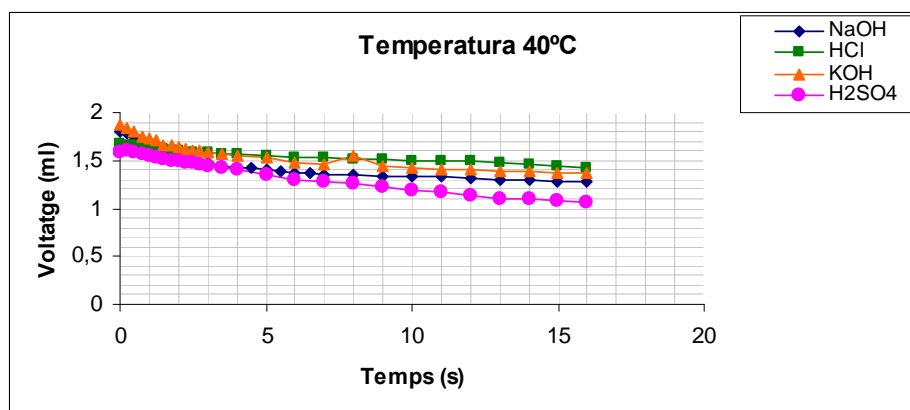
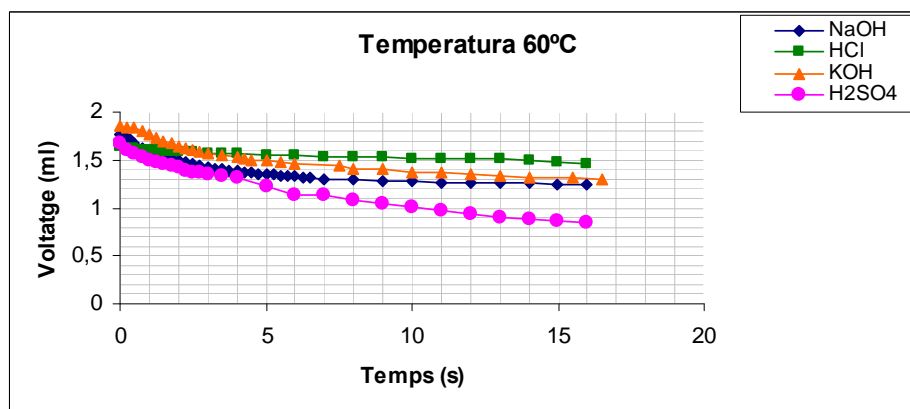
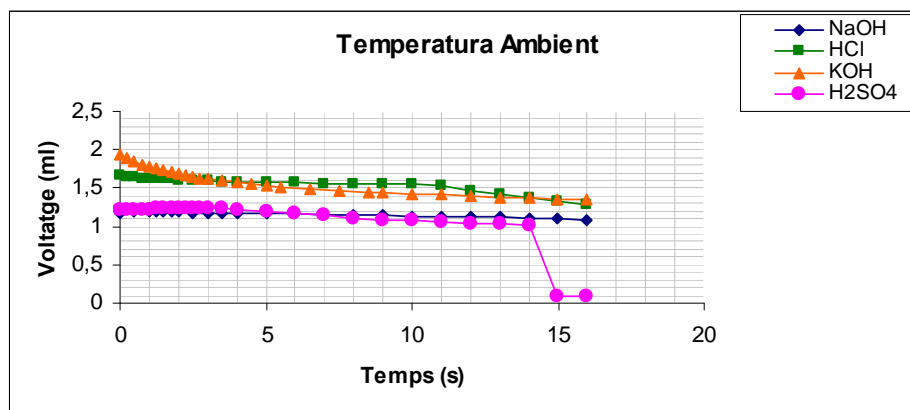
## 4.2.2. Voltatges amb diferents electròlits

### 4.2.2.1. Platí



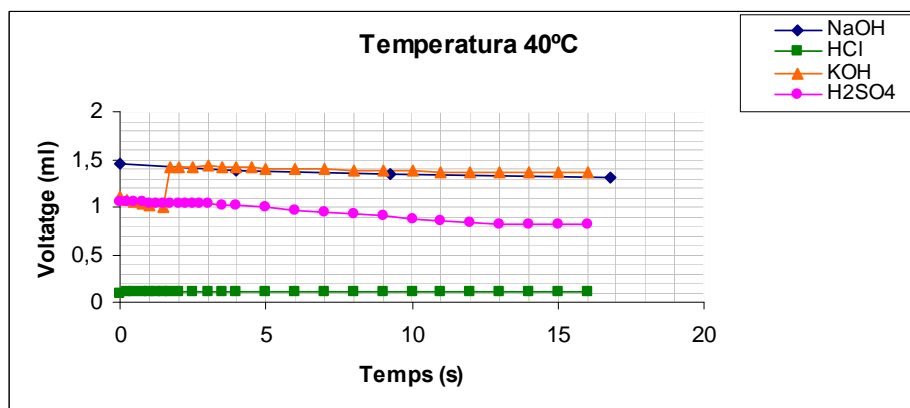
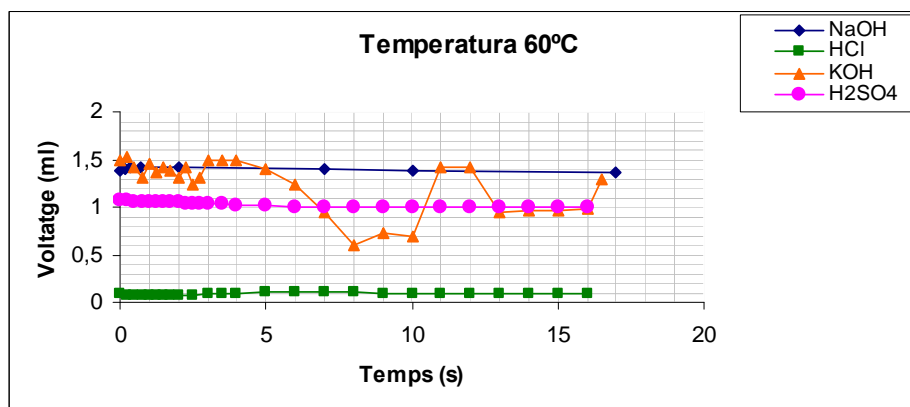
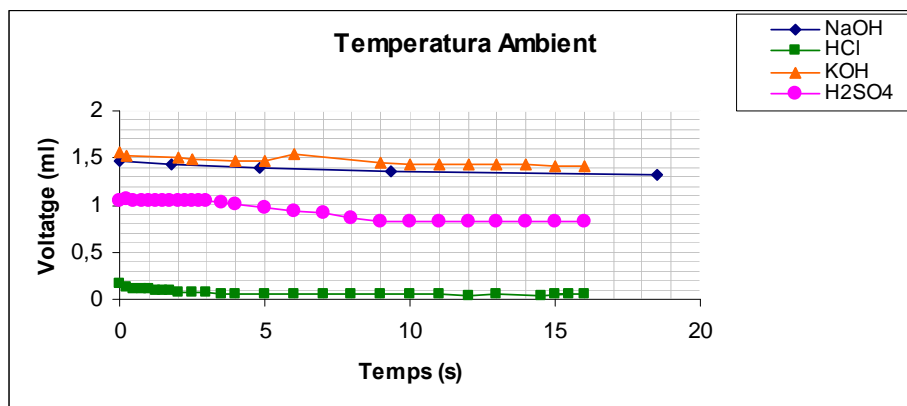
El platí ha resultat ser l'elèctrode més incompatible per tots els electròlits tot i no presentar formació de substàncies noves durant la reacció. Això verifica perquè és utilitzat com a catalitzador de la majoria de piles: no es pot utilitzar com a elèctrode ja que els resultats són nefastos, acompanyant a elèctrodes d'altres tipus millora el seu resultat (es comprova en la tercera pràctica), no crea noves substàncies i per tant no intervé en el funcionament de la pila negativament, i no acostuma a ser afectat pels canvis de temperatures, per això pot ser emprat en diversos tipus de piles com a catalitzador.

#### 4.2.2.2. Carbó



A temperatura ambient es mostra estable en tots els casos, menys el de l'àcid sulfúric, que com es veurà, estabilitza el comportament amb l'augment de temperatura. S'observa una millora en estabilitat i voltatge amb el canvi de temperatura, tot i que prefereix intermèdies. Resulta ser l'electrode que manifesta un comportament bo i constant amb tots els electrolits i temperatures. Sense desviar-se, a més, dels voltatges calculats teòricament.

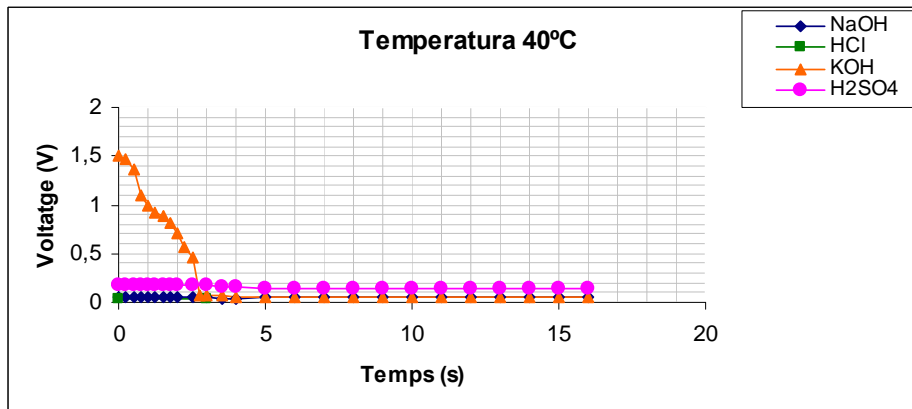
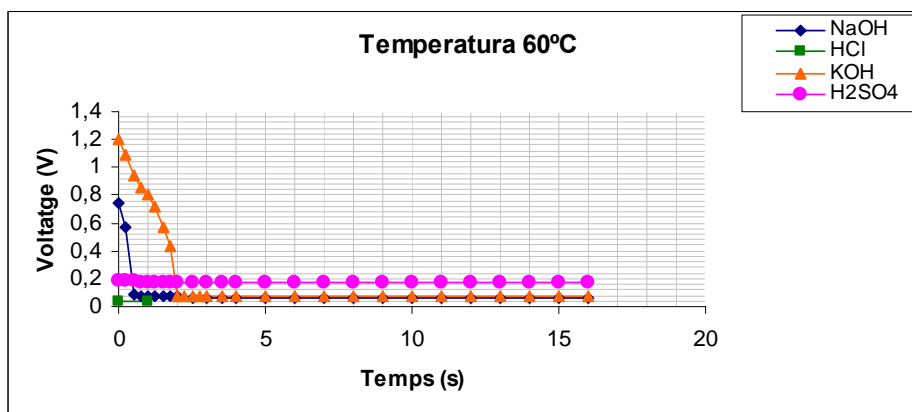
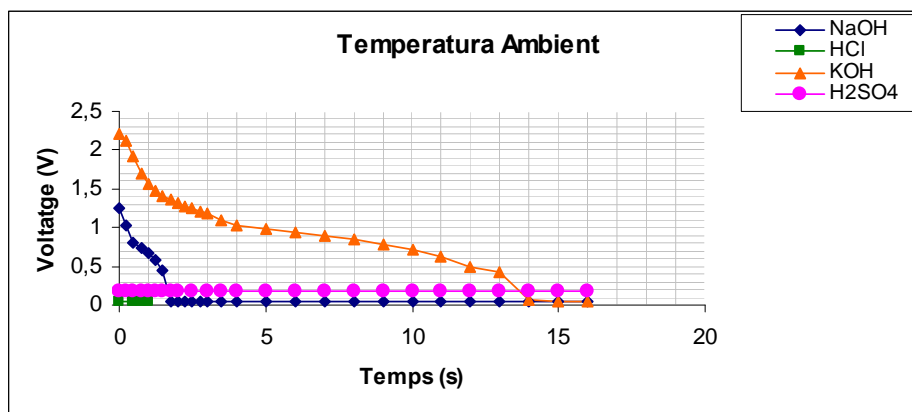
### 4.2.2.3. Níquel



El seu comportament s'assembla força al calculat, però si varia, sempre és cap a un voltatge millor que l'esperat. Manté un comportament estable en tots els electrolits menys amb el hidròxid potàssic, on es veu alterat per l'augment de temperatura.

El fet que provoca un voltatge teòric en molts dels casos és la formació de noves substàncies que en deterioren el funcionament.

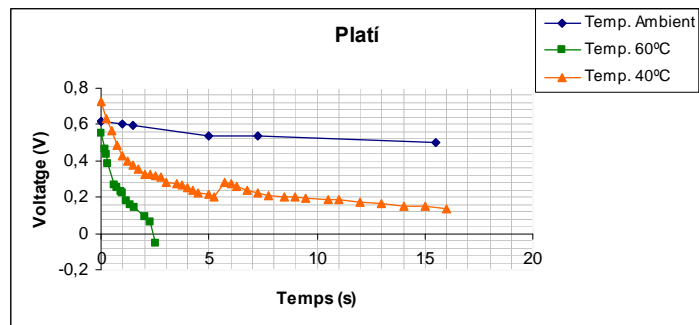
#### 4.2.2.4. Zinc



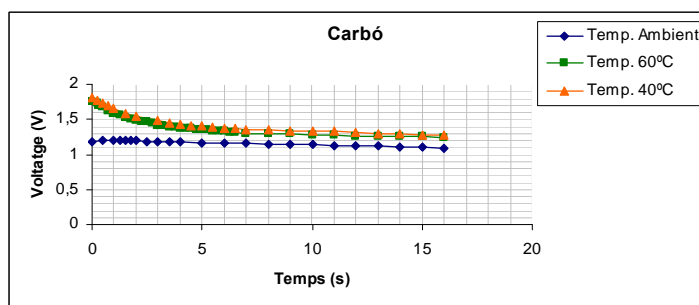
El zinc resulta inservible per les piles d'aquests quatre electròlits provats. En són tres les possibles causes: incompatibilitat amb els electròlits, presència de noves substàncies que n'empitjoren el comportament o bé que aquest elèctrode requereix de temperatures més elevades, amb les quals no s'ha treballat en aquestes piles.

### 4.2.3. Voltatges a diferents temperatures

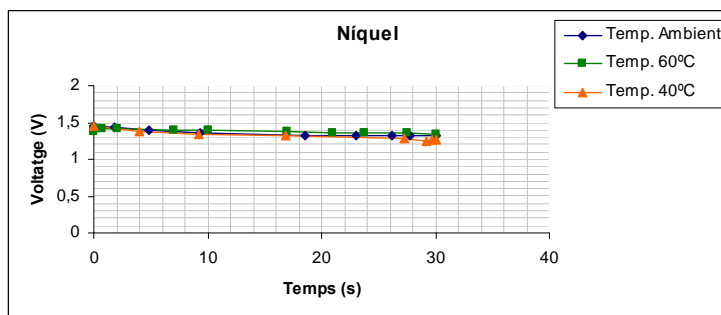
#### 4.2.3.1. Electròlit: NaOH



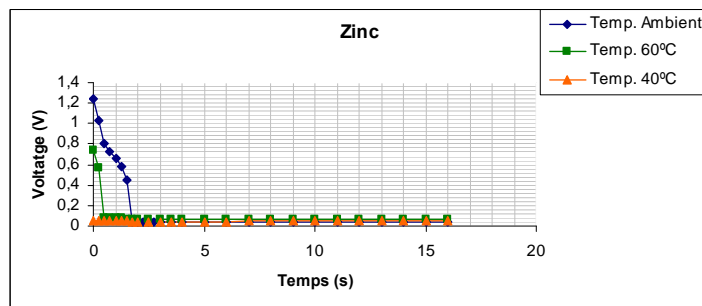
Al platí, en aquest electròlit, l'afecten claríssimament les temperatures altes, on s'observa un canvi profund en l'estabilitat del seu voltatge al llarg del temps.



El carbó no es mostra afectat de cap manera pels canvis de temperatura quan treballa amb hidròxid sòdic.

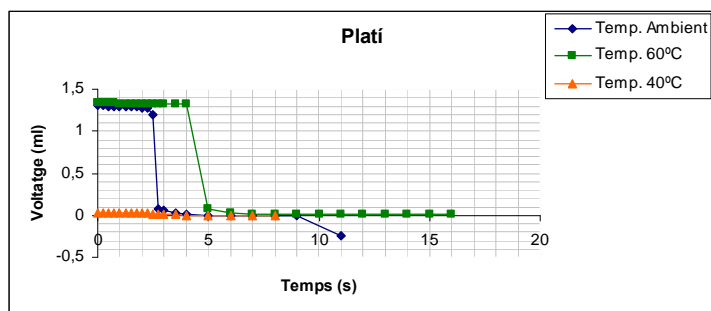


El níquel té un comportament regular sense davallar gairebé gens del voltatge inicial. El canvi degut a la temperatura quasi que no s'aprecia.

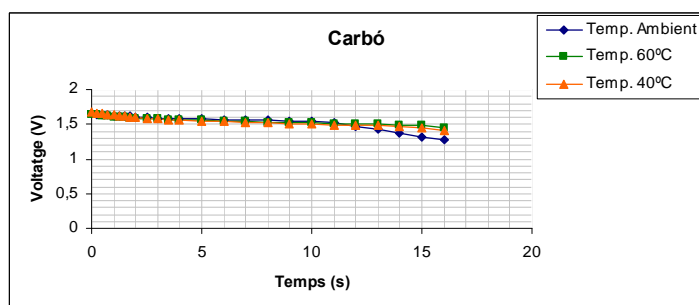


El zinc no resulta gens vàlid, ja que els resultats són mínims. Encara que marqui un punt elevat davalla estrepitosament amb molt poc temps.

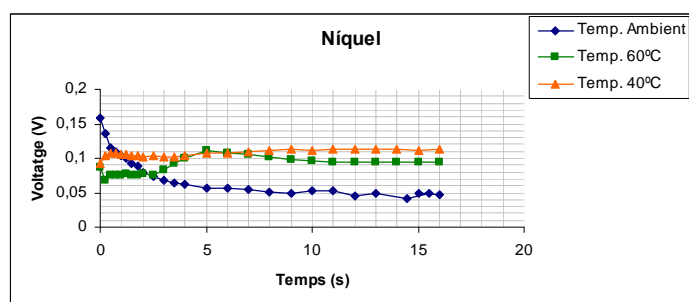
### 4.2.3.2. Electròlit: HCl



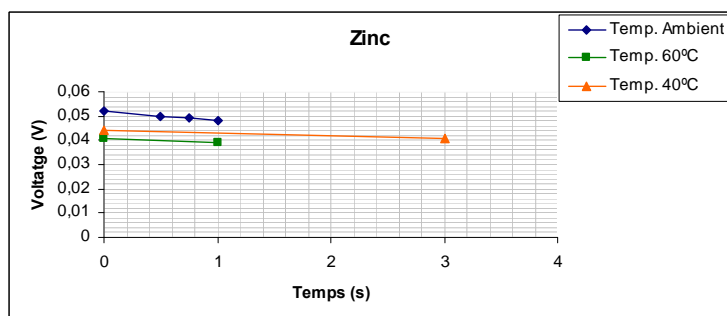
En el cas del platí, la temperatura intermèdia resulta ser la que més afecta el seu voltatge, tot i que tampoc aguanta gaire l'estabilitat en general.



El carbó resulta idoni per treballar amb aquest electròlit, no l'afecten per res les temperatures, i compleix les expectatives o les supera. A més, no sembla afectar-lo la formació de  $\text{CCl}_4$ .

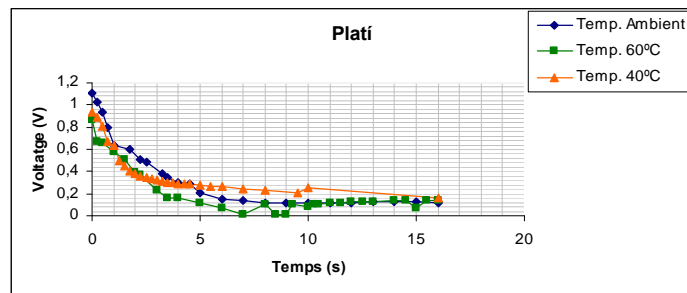


El níquel es manté bastant regular tot i que els voltatges són bastant baixos, no es nota un gran canvi amb l'augment de la temperatura. Sembla ser que la que li provoca un comportament més estable és la de 40°C.

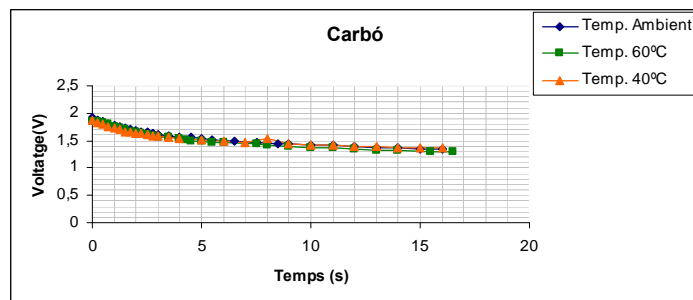


El zinc és completament nul per aquest electròlit, es poden observar molt bé els baixíssims voltatges que presenta, i no varia gaire amb la temperatura.

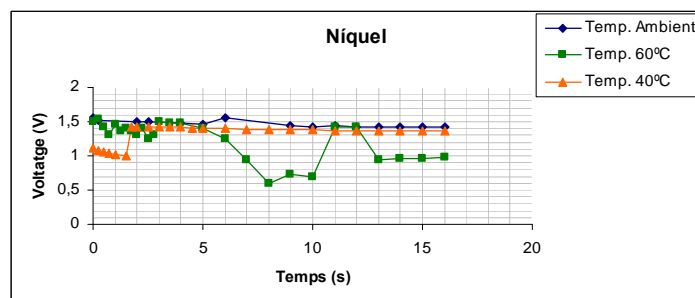
#### 4.2.3.3. Electròlit: KOH



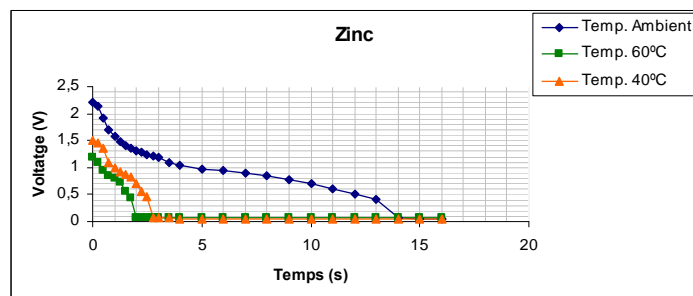
El comportament del platí no varia gairebé gens amb el canvi de temperatura, sembla que amb aquest és el que en resulta més estable en relació a les diferents temperatures.



El carbó resulta un dels millors elèctrodes per aquest electròlit, no varia gens el seu comportament amb els canvis de temperatura, i es manté estable a les variacions.

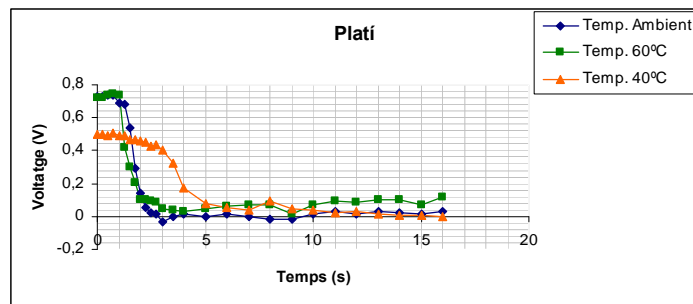


La temperatura de 60°C resulta la que més l'afecta l'elèctrode de níquel variant-ne contínuament amb alts i baixos el voltatge. En la resta segueix estable i amb nivells alts.

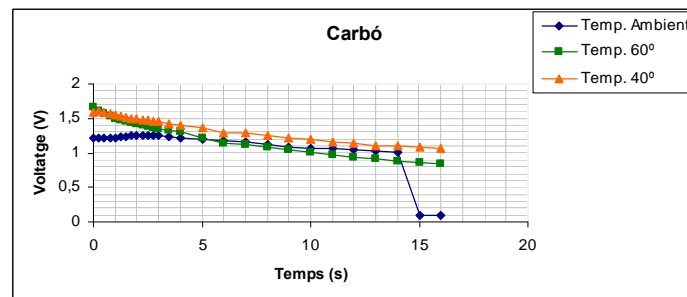


Les temperatures altes afecten molt al zinc ja que als dos minuts està per nivells pròxims al zero, tot i haver començat amb voltatges alts. Amb l'única que sembla mantenir-se millor és amb l'ambient.

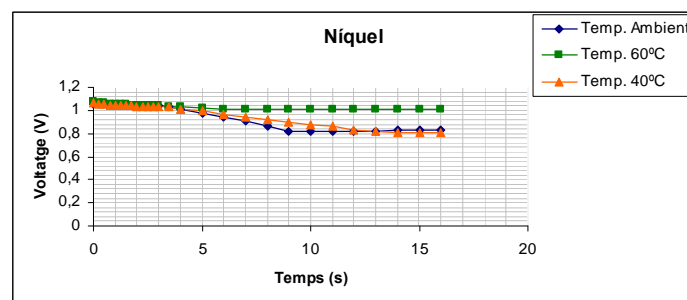
#### 4.2.3.4. Electròlit: $H_2SO_4$



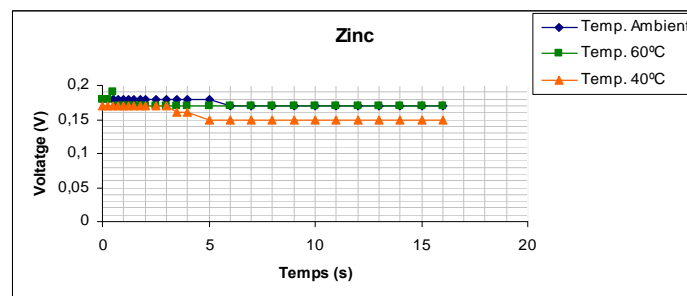
El platí resulta completament nul i incompatible amb aquest electròlit, a part de generar uns voltatges baixos manté una inestabilitat constant al llarg de tot l'interval de temps.



El carbó presenta un bon comportament, però s'estabilitza amb un augment no molt alt de la temperatura.



El níquel resulta un elèctrode bo amb un comportament continu, estable i amb voltatges alts tot i els canvis de temperatura.

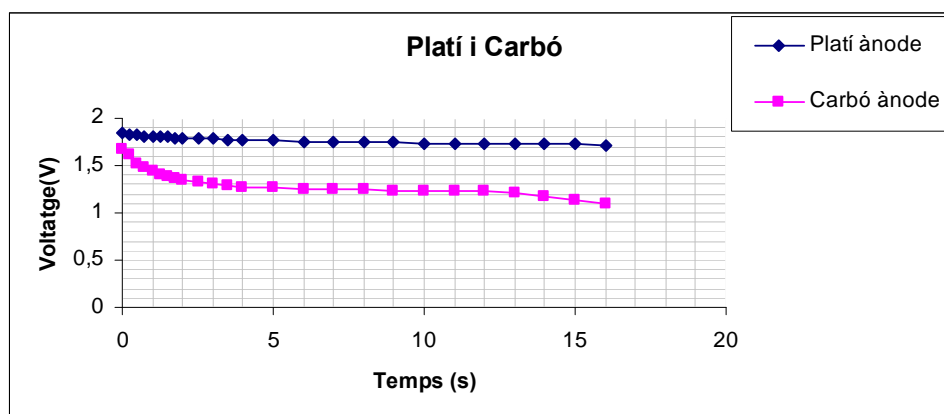


El zinc tampoc serveix per aquest electròlit ja que presenta uns voltatges molt baixos. Tot i que, si es fa referència a la temperatura no afecta el seu comportament, manté un ritme constant i sense davallar.

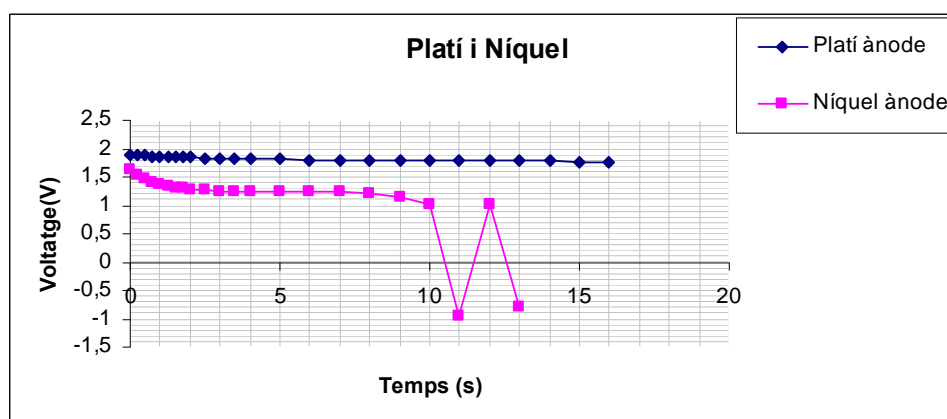
### 4.3. Pràctica 3.1.2. Combinacions d'elèctrodes

Al tractar-se d'una pràctica amb el mateix electròlit, KOH, i temperatura, ambient, en tots els casos, s'han organitzat els gràfics per parelles d'elèctrodes diferenciant únicament quin dels dos fa d'ànode en cada cas, ja que és el pol, negatiu, on es forma el gas hidrogen, bàsic per l'experiment.

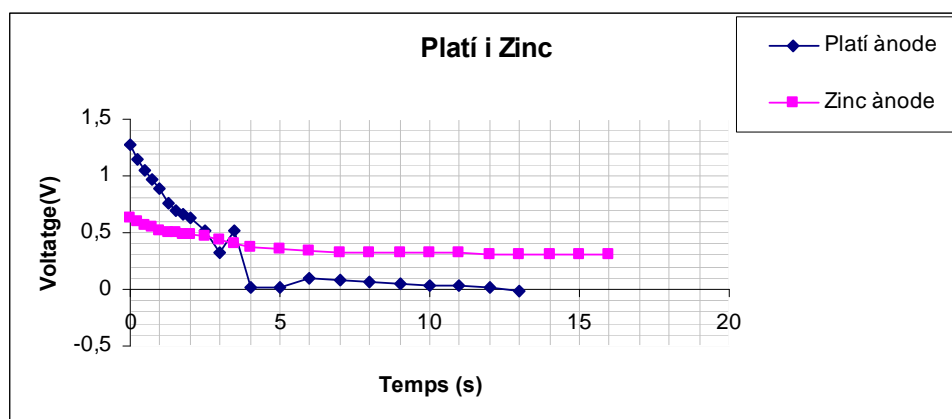
Comparant-ho amb els resultats obtinguts en la pràctica anterior (gràfica 4.2.1.3. KOH) on els elèctrodes sempre anaven emparellats per separat, obtenim els següents resultats:



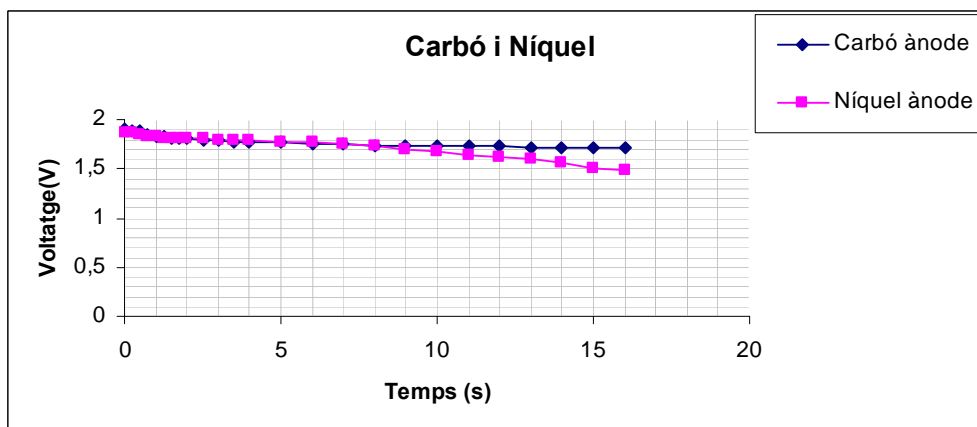
Al carbó no l'afectat el canvi d'un dels elèctrodes, el rendiment és pràcticament el mateix que amb dos de carbó. El platí en canvi, ha estat un canvi positiu molt marcat. Amb aquest electròlit amb prou feines arribava a 1V i es mantenia tres minuts, i ara, fent d'ànode genera un voltatge altíssim i latent. Millor l'elèctrode de platí com ànode que el carbó en aquesta combinació.



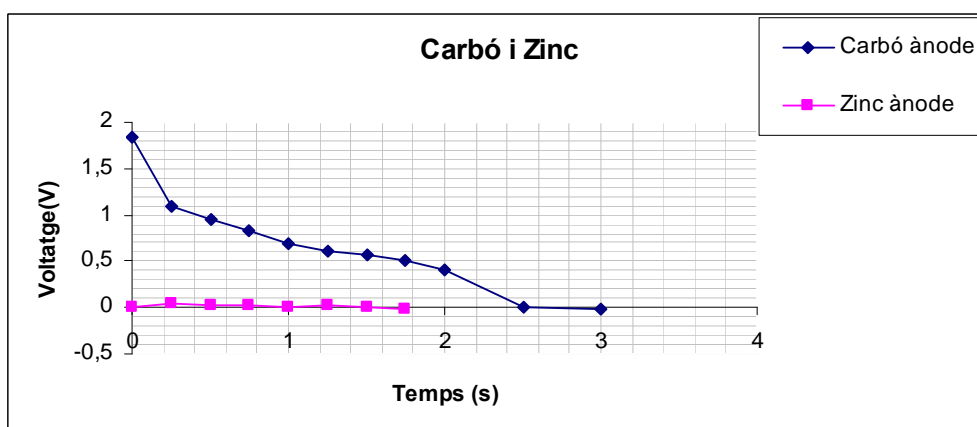
El platí segueix igual de perfecte en el comportament si fa d'ànode amb un voltatge alt i sense variacions. El níquel al fer d'ànode rebaixa el voltatge aconseguït quan feia de càtode, no el manté amb tanta estabilitat i cap al final es produeix una irregularitat molt marcada, com es pot observar en el gràfic.



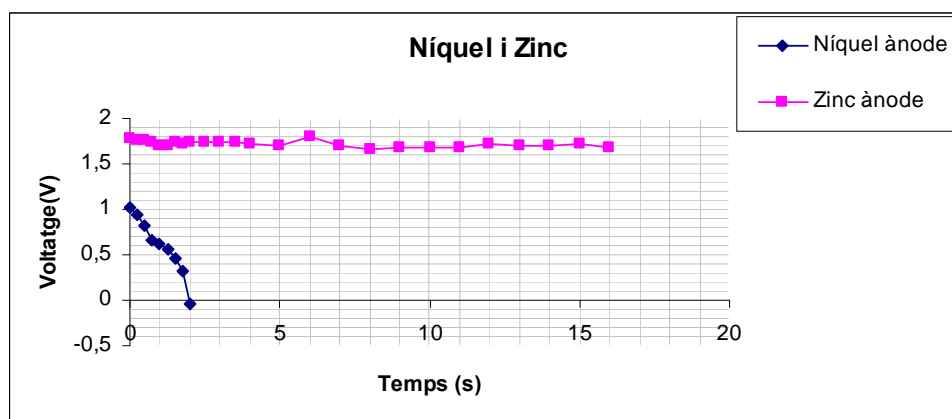
El platí amb el zinc és una mala combinació en els dos casos. En el que el platí fa d'ànode es pot observar com s'arriba a un voltatge considerable però com cau en picat al poc temps; i amb el zinc ja comença bastant baix i es manté.



El carbó i el níquel resulten una molt bona combinació. No sorprèn aquest resultat ja que foren els més alts i estables en la pràctica de KOH a temperatura ambient. Tant si un fa d'ànode com si ho fa l'altre la variació de comportament és mínima.



Una combinació dolenta. El zinc afecta el comportament de carbó quan aquest fa d'ànode, provocant el mateix comportament que els dos elèctrodes de zinc de la pràctica anterior. I quan fa d'ànode es pot observar com no funciona pràcticament gens.



En aquesta, es pot observar l'única intervenció del zinc realment profitosa quan fa d'ànode. Manté un voltatge alt i constant. Mentre que quan el níquel fa d'ànode, es desestabilitza el conjunt i el voltatge perd moltíssim.

#### 4.4. Comprovació de piles històriques i del mercat

##### 4.4.1. Pila Grove: elèctrodes Pt i electròlit $H_2SO_4$

No ha resultat. Com es pot observar a l'apartat 4.2.3.4.  $H_2SO_4$  no s'han obtingut voltatges gens alts ni estables. Segurament perquè la concentració 1M de l'electròlit no era suficient o la temperatura havia de ser més elevada. Són les úniques explicacions possibles ja que fou comprovat històricament que aquesta combinació realment funciona.

##### 4.4.2. Pila Bacon i alcalina: elèctrodes Ni i electròlit KOH (85%)

Ha funcionat. Observant el gràfic de l'apartat 4.2.3.3. KOH es pot apreciar que és a temperatures baixes quan el voltatge es manté més estable. Aquestes degueren ser les que emprà Bacon per la prova de la seva pila. Pot ser que augmentant molt més la temperatura el seu rendiment millori, això explicaria que aquesta combinació funcioni en una pila de combustible comercial, l'alcalina, però a temperatures de 90-100°C, amb les quals no s'ha experimentat al laboratori.

##### 4.4.3. Pila àcid fosfòric: elèctrodes Pt o C i electròlit àcid fosfòric

No ha funcionat, ha estat un dels electròlits que no funcionava. El fet que explica que realment n'existeixin unes amb aquestes característiques i a l'hora de voler-ho provar al laboratori no funcionés és la temperatura i la concentració. Aquestes treballen a temperatures de 175-200°C, que triplicuen les que s'han emprat al laboratori, així que el resultat obtingut és comprensible. A més, en les pràctiques s'ha utilitzat una concentració 1M, i en deu de requerir de més elevades per el seu funcionament.

## 5. Conclusions

### 5.1. Conclusions de les pràctiques

#### 5.1.1. Pràctica 3.1.1. *Electròlisi*

- Els elèctrodes més estables que s'han mantingut sense anomalies en tots els electròlits són els de platí. La seva conductivitat i manca de formació de noves substàncies els converteix amb els idonis. Es pot comprovar perquè doncs, un dels millors catalitzadors de les piles de combustible és el platí.
- El carbó també ha resultat ser més estable, però era poc resistent als àcids i es descomponia reduint cada cop més la vareta que feia d'elèctrode, per tant, depenent de l'electròlit en el que es trobés això reduiria la vida de la pila.
- El níquel per aquests electròlits no valdria gaire ja que reacciona amb aquests creant substàncies noves, i si es volgués obtenir oxigen no seria possible, menys en el cas del KOH que se'n crea de pur. És més, la seva velocitat de reacció i conductivitat són menors.
- El zinc és l'elèctrode que amb tots els electròlits ha generat substàncies noves a partir de la solució, no és molt recomanable per una pila de combustible amb aquests electròlits.

#### 5.1.2. Conclusions pràctica 3.1.2. *Pila combustible*

Les següents conclusions estan organitzades a partir dels elèctrodes per després extreure'n una general:

- El platí mostra una inestabilitat diferenciada en tots els electròlits provats, i pateix canvis bruscs des de voltatges alts fins a molt baixos. L'explicació possible és que ha de treballar amb concentracions majors i a temperatures més elevades a les provades, ja que no semblen afectar-lo els canvis produïts.
- El carbó ha mantingut uns voltatges per damunt de la mitjana i ben estables en els quatre electròlits. Es pot observar també que l'augment de temperatura ajuda a estabilitzar els seus canvis de voltatge.
- El níquel resulta ser el que ha mostrat més varietat. Ha adquirit voltatges considerables amb tots els electròlits menys amb el HCl, amb el que poc s'ha mogut del 0V. A més es pot observar que no l'afecten els canvis de temperatura, però en el cas de l'electròlit NaOH funciona millor a temperatures suaus, ja que a 60°C la inestabilitat era remarcable.
- El zinc es podria dir que no ha tingut èxit. Amb l'HCl i l'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> completament nul, i amb els dos restants, NaOH i KOH marcava un punt molt alt de voltatge als primers instants, fins 2,2V, però davallava en picat passats els dos primers minuts.

Així que es pot afirmar:

Elèctrodes i electròlits incompatibles: el platí es podria considerar nul i inestable davant de tots quatre electròlits, en major o menor grau. El níquel és completament incompatible amb l'HCl. El zinc és el mateix cas que el platí, però se'n salva l'electròlit KOH ja que dona la sensació que si s'anés augmentant la temperatura els resultats millorarien.

Millor pila: els elèctrodes serien de carbó, ja que ha resultat el que ha arribat a voltatges més alts amb tots els electròlits i mantenint una gran estabilitat. Per poder escollir la millor combinació a partir d'aquí s'han de tenir en compte diversos factors, si es tractés del voltatge obtingut més elevat s'escolliria l'HCl, ja que en totes les temperatures, encara que sigui per poca diferència, es manté capdavanter (veure gràfics apartat 4.2.2.2.), però cal tenir en compte que es generà una anomalia, la formació de CO<sub>2</sub>, així que millor buscar-ne un que no en formi. Queden l'hidròxid de sodi, NaOH, i el KOH, que no presenten anomalies; així que entre aquests s'escull el de voltatge més elevat i més estable, KOH.

Per tant, a partir dels resultats obtinguts en aquesta pràctica es pot arribar a la conclusió que la millor pila estaria formada per elèctrodes de carbó, electròlit d'hidròxid potàssic, i a 40°C, tot i que no amb gaire diferència respecte de les altres temperatures.

### **5.1.3. Conclusions pràctica 3.1.3. Combinació d'elèctrodes**

Com les conclusions de la practica anterior, s'organitzaran a partir dels elèctrodes, però en aquest cas dels que fan d'ànode:

- El platí quan fa d'ànode en la reacció, amb el que obté millor voltatge i més estable resulta ser el níquel, amb el qual arriba als 1,9V arrodonits i es manté gairebé invariable.
- El carbó reacciona millor generant més voltatge amb el níquel també, ja que arriben també als 1,8V aproximadament i s'hi mantenen bastant.
- El zinc resulta ser nefast com a ànode i càtode en totes les combinacions perjudicant a l'estabilitat que aporta l'altre elèctrode, però quan es combina amb el níquel aconsegueix uns voltatges d'1,7V, cosa que amb les altres en les quals participa no hi arriba mai.
- El níquel quan fa d'ànode en la reacció obté millors resultats tenint com a càtode amb el carboni claríssimament, 1,8V, ja que amb els altres és completament inestable i amb dades molt més baixes.

Seguint aquestes reflexions, i tenint en compte que tots s'atenen als resultats teòrics, se'n poden extreure les següents conclusions:

- El zinc no es pot combinar fent de càtode amb un altre elèctrode, ja que en cap de les combinacions s'han obtingut bons resultats.

- El níquel ha de fer de càtode per excel·lència, amb tots els elèctrodes, fins i tot el zinc, s'han obtingut grans resultats amb la seva combinació.
- Així que la millor pila de combinació d'elèctrodes amb electròlit de KOH a temperatura ambient tindria níquel com a càtode i platí com a ànode, ja que ha resultat el més estable i amb resultats majors.

### 5.2. Resolució d'objectius

Les conclusions extretes d'aquest treball respecte cadascun dels objectius són:

- **Estudiar el funcionament d'una pila de combustible.** S'ha recollit informació sobre les seves característiques i propietats, han estat resumides i treballades de manera que se n'ha conegut el funcionament. Això ha permès veure que són un avanç tecnològic bàsic per un futur pròxim on s'han de reduir les emissions contaminants i buscar alternatives a recursos energètics gairebé inexistents. El fet que es basi en un principi en el seu funcionament tan bàsic i simple com l'electròlisi i se'n pugui treure tant de profit resulta molt interessant.
- **Classificar els diferents tipus de piles.** S'han buscat tots els tipus de piles i s'han observat els factors característics. S'han escollit les més importants i han estat resumides i classificades. Podent-ne extreure que es diferencien entre elles per l'electròlit, els elèctrodes, la temperatura, el catalitzador, etc. i que són aquests elements els que les fan idònies per la seva aplicació; aportant la potència, la durabilitat i l'eficiència que es requereixen.
- **Experimentar amb diverses piles de combustible.** S'han realitzat pràctiques al laboratori simulant una pila de combustible partint del seu principi de funcionament bàsic, l'electròlisi invertida. Arran d'aquest plantejament s'ha treballat amb el voltàmetre de Hoffman anant variant diversos factors per comprovar el funcionament d'una pila en diverses condicions comparant els resultats obtinguts amb càlculs teòrics o les combinacions de pila ja existents en el mercat. S'ha comprovat que les diverses piles de combustible deuen el seu rendiment, durabilitat i potència als seus components bàsics, elèctrodes, electròlit i temperatura, que a partir de la compatibilitat que mantenen entre ells els milloren o empitjoren aquestes característiques.
- **Estudiar els diferents factors que afecten al funcionament de les piles.** El fer canviar en les pràctiques tres factors determinants, elèctrodes, electròlit i temperatura, s'ha permès remarcar-los com a elements característics i poder-ho comprovar experimentalment. Però, a més, a partir de la informació recollida en tot el treball s'ha deduït que també els afecta la presència de catalitzadors que en milloren el rendiment, la tolerància o no a impureses en el combustible i la pròpia resistència dels elèctrodes als agents als quals s'exposa, depenent-ne la durabilitat de la pila en molts dels casos.

- **Esbrinar les condicions per obtenir una pila òptima.** A partir dels experiments realitzats en aquest treball s'ha pogut analitzar el comportament de diferents combinacions de piles; i és per això que es pot afirmar que per aconseguir-ne una amb millors característiques es necessita: uns elèctrodes i electròlit compatibles, ja que no interessa que es formin substàncies noves que en deteriorin el funcionament, i a més, n'existeixen que no reaccionen de cap manera entre ells; s'ha d'adequar la temperatura, el grau d'acidesa i la concentració de l'electròlit a l'adequada, perquè pot ser que variant alguns d'aquests factors funcioni molt millor; ha de valdre's d'un elèctrode resistent a les substàncies en les quals es troba en contacte per tal d'augmentar la durabilitat de la pila; aconseguir una combinació que pugui admetre certes impureses en el combustible i que no s'afecti al seu funcionament; buscar un catalitzador alternatiu al platí però amb les mateixes condicions, així s'abaratirà el preu del mercat; i també es necessitaria adaptar les dimensions a l'aplicació per la qual ha estat dissenyada.

La pila òptima de les pràctiques realitzades està formada per elèctrodes de carbó, electròlit d'hidròxid potàssic, i amb temperatura de 40°C.

- **Determinar les seves aplicacions.** Al tractar-se, com s'ha vist, d'una espècie de motor elèctric no contaminant i fàcilment adaptable en qüestions de voltatge, combinant més o menys cel·les en sèrie dins d'una pila, les aplicacions resultants gairebé no posseeixen límit. Poden ser utilitzades en motors de cotxes, autobusos, avions, trens..., com a bateries portàtils, en mòbils, aparells de música, llanternes, per a missions espacials, en centrals de generació d'energia... Com n'existeixen amb tantes característiques i propietats diferents, permet ampliar el seu camp d'utilitat al màxim, fins i tot, per la vida quotidiana.
- **Experimentar amb una cel·la de combustible real.** Després d'haver realitzat una exhaustiva recerca pertinent al treball, no es trobà una cel·la de combustible disponible al mercat que complís els requisits de ser didàctica, que es pogués aconseguir en poc temps i que fos econòmica. Fins que es localitzà un cotxe de joguina ja preparat i que complia totes les condicions àmpliament. Amb aquest s'observà la viabilitat del funcionament d'una pila amb hidrogen, com afecten les impureses, i la seva aplicació en els vehicles motoritzats. A més es pogué analitzar la seva estructura de ben a prop comprovant-ne les característiques, fins i tot la de l'alliberament de vapor d'aigua com a residu.
- **Valorar l'estat de les piles de combustible al mercat.** A l'hora de buscar informació per aquest treball la majoria de textos estaven en anglès, senyal que es tracta d'una nova tecnologia que actualment s'està implantant i investigant. Actualment no es pot considerar que s'hagin llençat al gran mercat, ja que són desconegudes per la majoria de la població, no en saben res del seu funcionament i fins i tot la seva pròpia existència. Com la majoria

estan en fases d'investigació no s'han obert totes les possibilitats. Les previsions per ampliar el camp d'abastiment de les piles de combustible a la població en general es calcula cap a l'any 2020.

- **Analitzar l'estat actual dels recursos energètics.** L'home sempre a viscut gràcies a la seva interacció amb el medi ambient, però al llarg dels anys n'ha fet un abús i s'estan notant les conseqüències. Com consta en el treball i més detalladament en els annexos, el planeta s'està quedant sense recursos energètics primordials per la vida, com el petroli. És per això que cada vegada més s'estan posant en marxa investigacions cap a energies renovables, o com és el cas d'aquest treball, cap a alternatives de nivell energètic.
- **Presentar un futur amb piles de combustible.** L'estudi exhaustiu d'aquest recurs tecnològic verifica les prediccions que s'han deduït: amb les piles de combustible s'assegura un futur perfectament viable i rentable, és dels millors. Planteja la possibilitat d'eliminar el petroli del món dels combustibles ja que se'n produirà l'esgotament en uns trenta anys, i substituir-lo per un altre tipus de recurs energètic molt més net i gairebé inesgotable. L'hidrogen és un element molt abundant al planeta i, com consta en el treball, existeixen moltes maneres d'aconseguir la seva obtenció. Tot i que cal tenir en compte que es presentaria un problema, la majoria de maneres d'obtenir aquest combustible són bastant costoses o creen una contaminació innecessària, és per això que en el treball es dedueix que la manera més rentable per la seva producció seria la biològica, mitjançant algues verdes, més de 400 espècies identificades, que en determinades condicions generen hidrogen.  
Per tant, és gairebé segur que l'element que mourà el món dins de pocs anys serà l'hidrogen, una opció ecològica que feia anys que es buscava.

## 6. Valoració personal

La realització d'aquest treball m'ha resultat molt interessant. Es tractava d'un tema completament desconegut i m'ha agradat arribar al final entenent coses que en un principi no comprenia. Em resulta molt profitós haver-me informat d'un recurs que en un futur pròxim serà molt conegut, ho trobo positiu investigar dins d'un camp en el que mai m'havia mogut. A més, m'ha sorprès les ganes d'ajudar i de donar informació que transmetien les empreses amb les quals em vaig posar en contacte via correu electrònic.

També cal dir que no tot han estat avantatges. Al tractar-se d'un element encara en vies d'investigació i que no s'introduirà al mercat fins d'aquí uns quants anys, la informació i recursos ha estat molt més costosa d'aconseguir: la majoria de webs i llibres als que he hagut de recórrer estan en anglès tècnic, que m'ha costat de comprendre, però se li ha de sumar el fet de que es parlaven de coses que jo desconeixia per complet; és una de les grans dificultats que se m'han presentat. Altres posteriors, i no per això menys importants, han estat les hores de pràctiques, el recull de resultats, la recerca de materials i la confidencialitat de les empreses. Les hores de les pràctiques perquè cal pensar que si es fa l'operació de multiplicar el nombre d'elèctrodes provats, amb els corresponents electròlits, sumant els que no van funcionar i no consten en el treball, més les tres temperatures, i sumant-hi les pràctiques fallides que es van tornar a repetir més les dotze finals amb combinacions entre els elèctrodes s'obté el resultat aproximat d'unes cent pràctiques; cal tenir en compte que ocupaven, fent la mitjana, tres quarts d'hora cadascuna. A més, com ja he dit, el recull de resultats, perquè després de prendre les mesures es van tenir que passar a l'ordinador i crear diversos gràfics combinant-les entre elles; i a partir d'aquestes investigar totes les anomalies i comportaments estranys en algunes de les pràctiques, trobant substàncies que no sabia que existien. Però les dificultats relacionades amb les pràctiques no acaben aquí, ja que, al presentar-se la possibilitat d'ampliar-les amb nous elèctrodes de zinc i níquel, i amb nou electròlit, àcid fosfòric, es va tenir que engregar una recerca paral·lela: es visitaren totes les botigues de la ciutat i rodalies, es consultà per Internet... fins que s'acabà contactant amb la Repsol que proporcionà dos dels materials, i el tercer s'acabà per fer portar de Bèlgica; tot un repte. I la tercera dificultat fou la confidencialitat de les empreses, ja que, a part de que es trobaven lluny perquè no n'hi ha moltes per la península, no podien ensenyar els laboratoris per privacitat.

Tot i això he trobat molt positiu realitzar aquest treball, m'ha fet conscienciar de com estan les coses al meu voltant, presentant-me un aparell poc popularitzat i haver-me d'espavilar partint de zero; el considero molt interessant i profitós, per mi mateixa i per els que se'l llegeixin, ja que és un tema sobre el que s'hauria de parlar més i posar en marxa tan aviat com sigui possible.

## 7. Bibliografia

### 7.1. Llibres

- RIESENFELD, E. H.; SAURAS, J.M. (1942). *Tratado de química inorgánica*. Washington: provenza, 273.
- NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY. (2002). *Fuel cell handbook; prepared by Energy and Environmental Solutions for National Energy Technology Laboratory*; Orinda: T. Books. ISBN 0-89934-371-6.
- Weidlich, E.; Siemens A.G. (1987). *Constitución y funcionamiento de las pilas de combustible*. Barcelona, Berlín i Munich : Marcombo Boixareu. ISBN 84-267-0652-5
- Hoogers, Gregor. (2003). *Fuel cell technology: handbook*. Boca Ratón, Florida: CRC. ISBN 0-8493-0877-1.
- O'Hayre, Ryan P. (2006). *Fuel cell fundamentals*. Hoboken: John Wiley and sons. ISBN 0-471-74148-5.

### 7.2. Webs

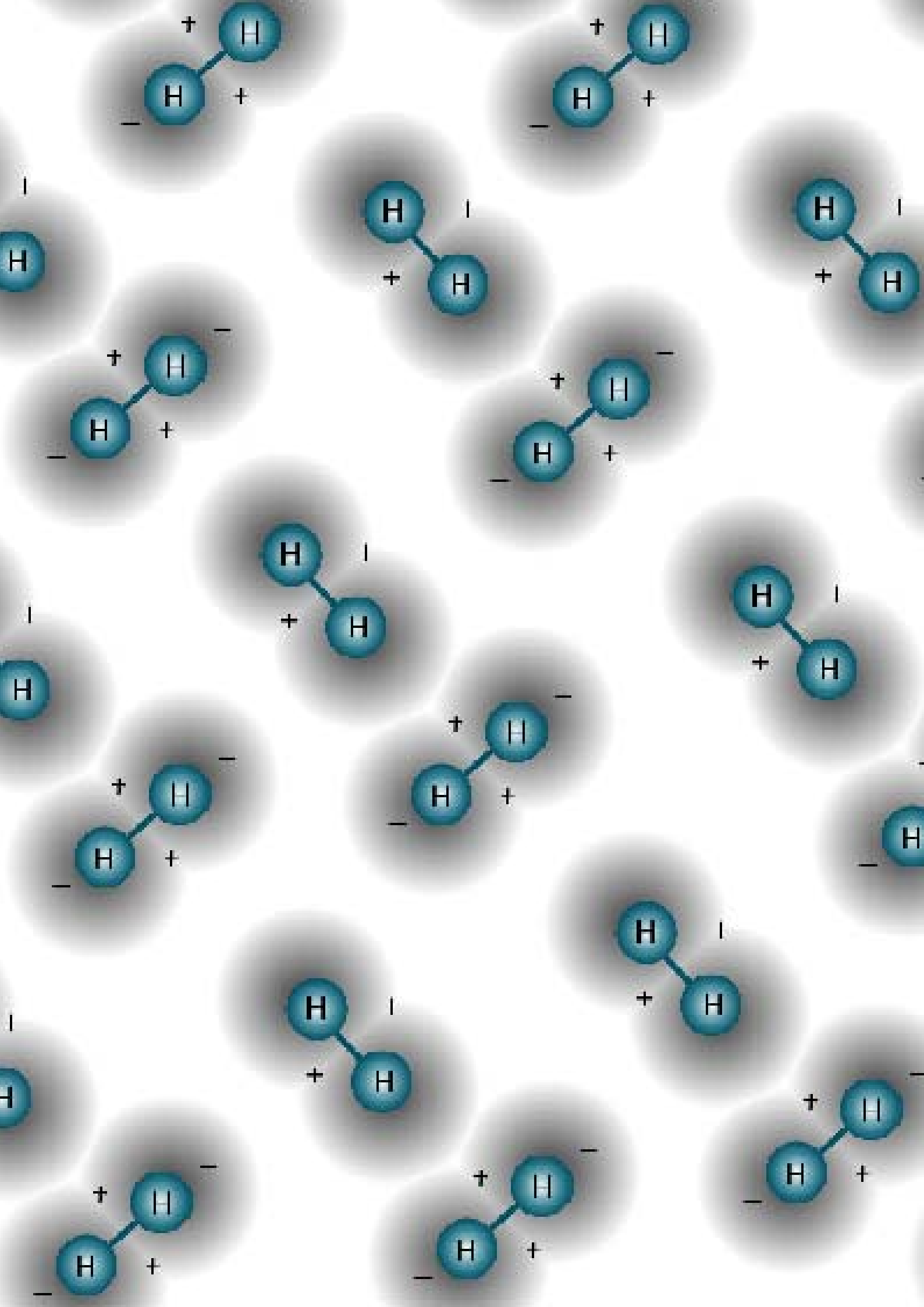
- [www.segulab.com/fis.php?q=niso4](http://www.segulab.com/fis.php?q=niso4)
- [www.webelements.com](http://www.webelements.com)
- [www.hidrogenio.com.mx/productos/autos-de-hidrogeno/h-racer/](http://www.hidrogenio.com.mx/productos/autos-de-hidrogeno/h-racer/)
- [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- [www.hynergreen.com](http://www.hynergreen.com)
- [www.ajusa.es](http://www.ajusa.es)
- [www.ciemat.es](http://www.ciemat.es)
- [www.ballard.com](http://www.ballard.com)
- [www.appice.es](http://www.appice.es)
- [www.geocities.com/pato\\_donald\\_2000/fuel\\_cell/#BM\\_Dónde\\_puedo\\_comprar](http://www.geocities.com/pato_donald_2000/fuel_cell/#BM_Dónde_puedo_comprar)
- [www.global-hydrogen-bus-platform.com/InformationCentre/ForSchools](http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/InformationCentre/ForSchools)
- [iabot.iespana.es/ciencia/quimica/produccion\\_hidrogeno.htm](http://iabot.iespana.es/ciencia/quimica/produccion_hidrogeno.htm)
- [es.geocities.com/diecam21/pagina1.html](http://es.geocities.com/diecam21/pagina1.html)
- [www.fuelcells.org/basics/gallery.html](http://www.fuelcells.org/basics/gallery.html)
- [www.aepro.com/congreso\\_03/pdf/o.alonso@isofoton.com\\_c6d0a8a7c7a1944be1fb4bfe08ca4e53.pdf](http://www.aepro.com/congreso_03/pdf/o.alonso@isofoton.com_c6d0a8a7c7a1944be1fb4bfe08ca4e53.pdf)
- [www.acer.es/](http://www.acer.es/)
- [www.ariema.com/Prod\\_servicios/consultoria\\_hfc.htm](http://www.ariema.com/Prod_servicios/consultoria_hfc.htm)
- [aeh2.org/](http://aeh2.org/)
- [cursoh2.com/](http://cursoh2.com/)
- [www.cienciateca.com/fuelcells.html](http://www.cienciateca.com/fuelcells.html)

- [www.tecnociencia.es/especiales/hidrogeno/introduccion.htm](http://www.tecnociencia.es/especiales/hidrogeno/introduccion.htm)
- [es.wikipedia.org/](http://es.wikipedia.org/)
- [www.universia.es/html\\_estatico/portada/actualidad/noticia\\_actualidad.html](http://www.universia.es/html_estatico/portada/actualidad/noticia_actualidad.html)
- [www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/urbano/2006/05/25/152369.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/2006/05/25/152369.php)
- [www.elpais.com/articulo/internet/pila/futuro/papel/elpeputec/20070814elpepuned1/Tes](http://www.elpais.com/articulo/internet/pila/futuro/papel/elpeputec/20070814elpepuned1/Tes)
- [www.imaginarium.es/vIE/index.asp](http://www.imaginarium.es/vIE/index.asp)
- [tec.fresqui.com/microsoft-ofrecera-pilas-de-combustible](http://tec.fresqui.com/microsoft-ofrecera-pilas-de-combustible)
- [www.pineinst.com/echem/viewproduct.asp?ID=46239](http://www.pineinst.com/echem/viewproduct.asp?ID=46239)
- [www.fuelcells.org/](http://www.fuelcells.org/)
- [www.howstuffworks.com/fuel-cell.htm](http://www.howstuffworks.com/fuel-cell.htm)
- [www.fuelcelltoday.com/](http://www.fuelcelltoday.com/)
- [www.fueleconomy.gov/feg/fuelcell.shtml](http://www.fueleconomy.gov/feg/fuelcell.shtml)
- [www.fuelcell-magazine.com/](http://www.fuelcell-magazine.com/)
- [www.appice.es/nuevaweb/esp/2/2\\_3.htm](http://www.appice.es/nuevaweb/esp/2/2_3.htm)
- [ec.europa.eu/research/rtdinfo/42/01/article\\_1317\\_es.html](http://ec.europa.eu/research/rtdinfo/42/01/article_1317_es.html)
- [www2.uni-siegen.de/~pci/versuche/spanish/kapitel2.html](http://www2.uni-siegen.de/~pci/versuche/spanish/kapitel2.html)
- [www.quimica.urv.es/~w3siiq/DALUMNES/01/siiq6/pagina1.html](http://www.quimica.urv.es/~w3siiq/DALUMNES/01/siiq6/pagina1.html)
- [www.casavonen.com/HC-100.htm](http://www.casavonen.com/HC-100.htm)
- [www.claudio-otero.cl/fuel\\_cells/#Celdas\\_de\\_Combustible\\_en\\_el\\_Transporte](http://www.claudio-otero.cl/fuel_cells/#Celdas_de_Combustible_en_el_Transporte)
- [www.invenia.es/inveniatags:pilas\\_combustible](http://www.invenia.es/inveniatags:pilas_combustible)
- [www.cervantesvirtual.com/servlet/SirveObras/12920525327810495654435/p0000001.htm#PagFin](http://www.cervantesvirtual.com/servlet/SirveObras/12920525327810495654435/p0000001.htm#PagFin)
- [www.fcway.com/principle\\_history\\_es.htm](http://www.fcway.com/principle_history_es.htm)
- [www.monografias.com/trabajos11/pilacom/pilacom.shtml#UNO](http://www.monografias.com/trabajos11/pilacom/pilacom.shtml#UNO)
- [www.cienciateca.com/fuelcells.html](http://www.cienciateca.com/fuelcells.html)
- [www.edelwises.com/cecilia/04\\_piles.htm](http://www.edelwises.com/cecilia/04_piles.htm)
- [www.fuelcellmarkets.com/fuel\\_cell\\_markets/1,1,1.html](http://www.fuelcellmarkets.com/fuel_cell_markets/1,1,1.html)



PILES DE  
COMBUSTIBLE:  
UN MÓN PER  
DESCOBRIR

**ANNEXOS**





## Índex Annexos

Pàgina

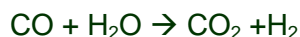
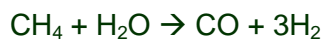
- **Annex I: L'hidrogen** ..... **2-4**
- **Annex II: Ampliació tipus de piles de combustible** ..... **5-6**
- **Annex III: Per saber-ne més** ..... **7-11**
- **Annex IV: Fitxa del cotxe H-racer** ..... **12-14**
- **Annex V: Pràctiques al laboratori** ..... **15-18**
- **Annex VI: Gràfics Pràctica electròlisi**..... **19-34**

## Annex I: *L'hidrogen*

### Obtenció del seu combustible, l'hidrogen

Tot i que en l'actualitat, pràcticament el 95% de l'hidrogen es produeix a partir de combustibles fòssils, n'existeixen d'altres que podran ser emprats més freqüentment en un futur viable:

- Reformat amb vapor: amb aquest procediment l'hidrogen s'obté a partir d'hidrocarburs, fonamentalment de gas natural. El principal component del gas natural és el metà  $\text{CH}_4$ , y la reacció consisteix bàsicament en separar el carboni de l'hidrogen. El procés té lloc en dues etapes: en la fase inicial, el gas natural es converteix en hidrogen, diòxid de carboni i monòxid de carboni. La segona etapa consisteix en produir hidrogen addicional i diòxid de carboni a partir del monòxid de carboni de la primera etapa tractant-lo amb una corrent de vapor a alta temperatura. L'hidrogen produït s'emmagatzema en tancs.



- Oxidació parcial de combustibles fòssils amb defecte d' $\text{O}_2$ : s'obté una mescla d'hidrogen que posteriorment es purifica. Les quantitats d'oxigen i vapor d'aigua són controlades perquè la gasificació continuï sense necessitat d'aportació d'energia.



- Electròlisi de l'aigua: passar corrent elèctric a través de l'aigua, es dissocien l'oxigen i l'hidrogen.



- Fotoelectròlisi: aprofita la radiació solar per generar corrent elèctrica capaç de produir la dissociació de l'aigua.

- Gasificació de biomassa: es tracta de sotmetre la biomassa a un procés de combustió incomplet entre 700 i 1200°C. El producte resultant és un gas combustible compost fonamentalment d'hidrogen, metà i monòxid de carboni.

- Piròlisi: combustió incompleta de la biomassa en absència d'oxigen a uns 500°C. Obtenint carbó vegetal i una mescla de gasos d'hidrogen, monòxid i diòxid de carboni.

- Producció biofotolítica: per exemple, un cianobacteri i les algues verdes poden produir hidrogen, utilitzant únicament la llum solar, aigua i hidrogenasa com a enzim. Aquesta està en període d'investigació i més de 400 espècies han estat identificades com a capaces d'aquesta reacció.

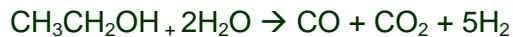
- Producció a partir de metanol com a combustible: és possible a bord d'un mateix vehicle, i per tant, seria idònia per el consum in situ que requereix la pila del combustible. Existeixen tres vies diferents:



- Reformat amb vapor d'aigua:  $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$

- Descomposició:  $\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$

- Producció a partir d'etanol com a combustible: aquesta produeix monòxid de carboni que és molt perjudicial per la membrana d'intercanvi de protons de la pila.



Molta de la producció d'hidrogen a partir de matèria primària com poden ser els hidrocarburs i l'aigua necessita d'importants quantitats d'energia. És per això que en l'actualitat la investigació es centra en descompondre l'hidrogen de l'aigua a partir d'energies fotovoltaica, eòlica, hidràulica, solar, o geotèrmica, és a dir, sense carboni.

### Infraestructures pel transport d'hidrogen

No hi ha dubte que l'economia de l'hidrogen necessita de tot un sistema per assegurar la producció i l'abastiment d'aquest combustible arreu però, al igual que l'ou i la gallina, s'ha estat discutint sobre què s'instaurarà primer, les instal·lacions o les tecnologies d'hidrogen.

Tal com la futura indústria i economia de l'hidrogen requerirà producció en un futur, també es necessitarà d'un mètode efectiu per repartir-ne els resultats. Existeixen diverses possibilitats amb les quals aconseguir aquest objectiu:

- Tubs: A Europa sobre els 1500km i als Estats Units 720km de tubs d'hidrogen, una manera bastant efectiva de transport. Posseeixen unes característiques determinades de la pressió en la qual treballen, el diàmetre dels tubs... Aquest sistema ha estat en ús durant 50 anys i no hi ha hagut cap accident.
- Hidrogen líquid: l'hidrogen líquid s'aconsegueix a temperatures de  $-253^\circ\text{C}$ . El procés de refredament requereix un considerable consum d'energia, però per viatges a llarga distància i com a combustible en d'altres aplicacions segueix tenint les seves avantatges.
- Transport: tant si és en líquid com en sòlid pot ser transportat en tancs amb vaixell, en avió, en camions... ja que el pes és molt reduït.
- Hídrids de metall: existeixen certs metalls que tenen la capacitat d'absorbir hidrogen sota determinades temperatures i pressions, creant hídrids. Aquests són compostos que contenen hidrogen i un o altres elements diferents.

Tot i el fàcil transport de l'hidrogen i la seva lleugeresa, existeix un problema a l'hora de omplir els dipòsits. És veritat que el seu rendiment energètic és molt gran respecte al pes del gas, però no amb volum, així que s'ha de plantejar la possibilitat de comprimir-lo en un tanc a pressió, mantenir-lo en estat líquid completament aïllat o en un compost sòlid.

## Fotografies



Tancs de transport d'hidrogen



Tubs d'hidrogen

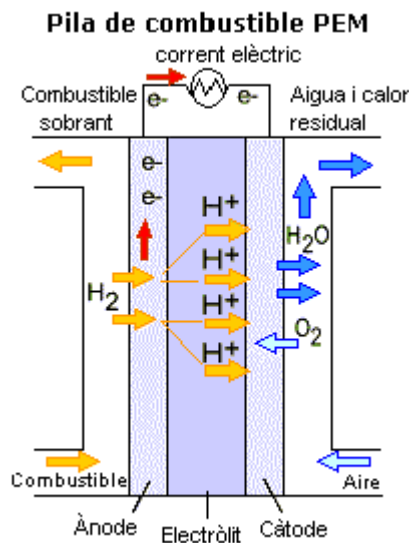


Estació de hidrogen (Madrid)



Estació d'hidrogen (Barcelona)

## Annex II: Ampliació tipus de piles de combustible

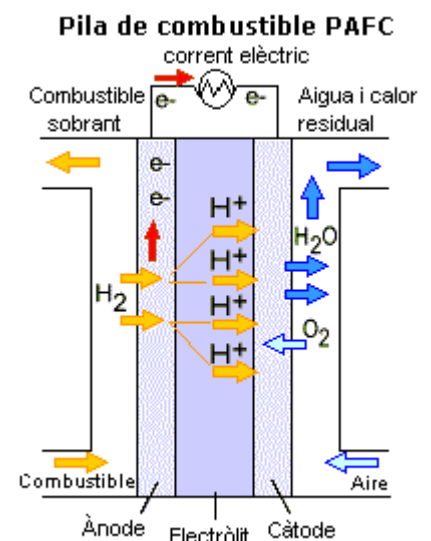


- **Membrana polimèrica (PEM)**. Són el grup típicament utilitzat en els vehicles. Cada cel·la conté diverses capes de matèries diferents. Una sola cel·la PEM consisteix en dos elèctrodes i dues capes de catalitzador, separat per una membrana d'electròlit polímer, el PEM. Aquest és un material especialment tractat que sembla plàstic comú, però que només deixa traspasar protons i bloqueja els electrons. El PEM és la clau de la tecnologia de les piles de combustible: és imprescindible que només passin protons entre l'ànode i el càtode, ja que altres substàncies que passessin per l'electròlit interrompien la reacció química.

En un costat de la cel·la, el gas hidrogen flueix pels canals fins l'ànode. A l'altre costat de la cel·la, el gas oxigen, obtingut de l'aire exterior, flueix pels canals fins el càtode. L'hidrogen en el costat del primer elèctrode, l'ànode, es mou per la cel·la fins que troba la primera de les dues capes de catalitzador. Aquest causa que les molècules d'hidrogen es converteixin en protons d'hidrogen, renunciant als seus electrons i cedint-los a l'ànode. Mentre els protons emigren pel PEM a la segona capa del catalitzador, el corrent d'electrons amb càrrega negativa segueix el camí amb menys resistència elèctrica, el circuit extern, fins la càrrega oposada del càtode. Aquest flux d'electrons crea l'electricitat, la calor, i l'aigua més endavant. Quan els electrons tornen de fer el "treball" reaccionen amb l'oxigen i els protons d'hidrogen en el càtode formant aigua. La major part de l'aigua reunida és tornada a emprar dintre del sistema, però una petita quantitat és alliberada en forma de vapor d'aigua.

La calor és engendrada d'aquesta unió, així com de la resistència de fregament de la transferència de ions per la membrana. Aquesta energia tèrmica pot ser emprada fora de la pila de combustible.

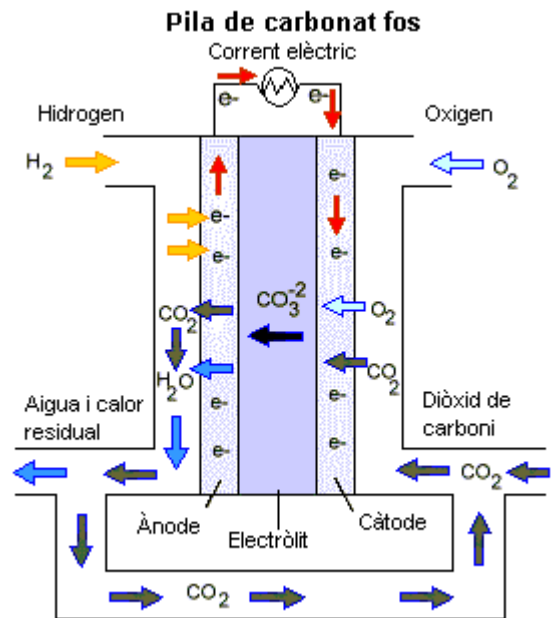
- **Àcid fosfòric (PAFC)**. Aquestes piles utilitzen àcid fosfòric líquid com electròlit i elèctrodes de carboni porosos amb catalitzador de platí. Són considerades com la primera generació de piles de combustible modernes, és un dels tipus més desenvolupats i emprats en els nostres dies, com en generació d'energia estacionària o en vehicles pesats, com autobusos urbans.



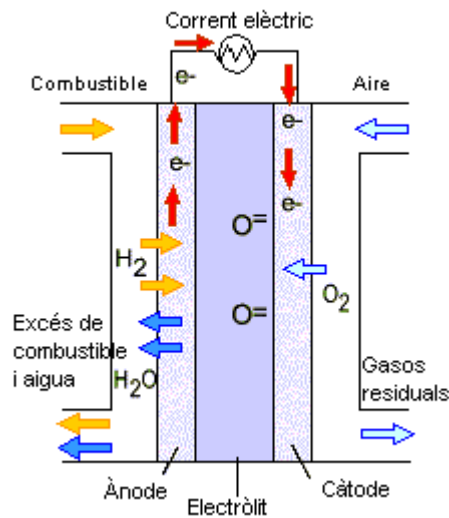
Un dels seus avantatges és la poca sensibilitat al  $\text{CO}_2$  que presenten. Els seus rendiments és mantenen més alts quan es tracta de generadors d'energia elèctrica i calorífica, però tenen diversos inconvenients a tenir en compte: com produeixen menys energia que altres piles en comparació en pes i volum acostumen a ser de grans dimensions, pesants i més cares, afegint-hi al preu també el cost del catalitzador de platí.

- **Carbonats fosos (MFCF).** S'estan desenvolupant en l'actualitat per plantes d'energia de carbó en la producció d'electricitat. Són piles de combustible d'altres temperatures, de  $600^\circ\text{C}$  a  $650^\circ\text{C}$  que utilitzen com a electròlit un composts de mesclades de sals de carbonat foses, com de liti i potassi o liti i sodi, que presenten una elevada conductivitat iònica, disperses en una matriu de ceràmica porosa d'òxid d'alumini.

Una de les avantatges de treballar a altes temperatures gràcies a aquests materials és la reducció de costos al no caldre utilitzar metalls purs com a catalitzadors. Altres són la pròpia producció d'hidrogen dins mateix de la pila a partir de combustibles d'energia més densa, conversió interna. No són propenses a la contaminació dels gasos procedents del carboni i la seva eficiència és bastant elevada, 60%. D'altra banda, el seu gran inconvenient és la duració, ja que els altes temperatures i els electròlits corrosius deterioren la pila. S'estan investigant materials alternatius més resistents però que no en variïn el rendiment.



#### Pila de combustible SOFC



- **Òxid sòlid (SOFC).** Aquestes piles de combustible utilitzen com electròlit un components de ceràmica dur i no porós, això permet que les piles no presentin una configuració laminar com la resta. Disposen d'un rendiment d'entre el 50 i el 60%, però en aplicacions amb cogeneració aquest augmenta fins el 80-85%. Operen a temperatures molt elevades, al voltant dels  $1000^\circ\text{C}$ , i això requereix una lenta arrancada i abundant protecció per evitar que la calor s'escapi i protegir el personal que treballa amb elles.

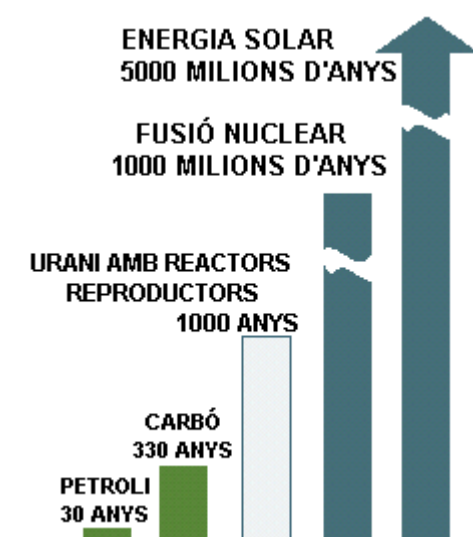
Actualment s'està investigant per tal de que aquestes piles funcionin a temperatures més baixes i això permeti reduir costos i augmentar la vida d'aquestes piles.

## Annex III: *Per saber-ne més*

### Mediambient i recursos energètics

Les cel·les de combustible solen ser considerades molt atractives per a utilitzacions modernes per la seva eficàcia alta i idealment lliures d'emissions, en contrast amb combustibles actualment més comuns, com poden ser el metà o gas natural, que generen diòxid de carboni. Gairebé el 50% de tota l'electricitat produïda als Estats Units ve del carbó. El problema és que el carbó és una font d'energia relativament bruta. Si l'electròlisi, un procés que necessita electricitat, s'utilitza per a crear l'hidrogen usant energia de les centrals elèctriques, en realitat s'està creant el combustible hidrogen a partir del carbó. Tot i que la cel·la de combustible emet solament calor i aigua com residus, el problema de la contaminació encara estarà present en les centrals elèctriques.

Un acostament integral ha de considerar els impactes d'un escenari ampli de l'hidrogen. Això fa referència a la producció, a l'ús i a la disposició de la infraestructura i dels convertidors de l'energia. Els apilats de les cel·les de combustible avui dia tenen una gran quantitat de catalitzadors. Això és a causa de la corrosió que sofreix el catalitzador i per tal de que no redueixi la seva activitat aquest ha de ser sobredimensionat. Les reserves limitades de platí acceleren la síntesi d'un complex inorgànic molt similar a la base catalítica del sulfur de ferro dels bacteris hidrogenasa per a començar a prendre mesures. Les reserves del món del platí són insuficients per poder donar suport a una conversió total de tots els vehicles a cel·les de combustible: una introducció significativa de vehicles amb l'actual tecnologia, per tant, només aconseguiria que el valor comercial de platí s'elevés i les seves reserves descendissin.



En la imatge de l'esquerra es pot observar els anys que queden abans de que s'esgotin aquests recursos. Cal fixar-se especialment amb el carbó i el petroli, ja que guarden molts relació amb el tema tractat. El petroli és el recurs al qual la pila de combustible pretén substituir d'aquí vint anys, i el carbó és un dels sistemes d'obtenció de l'hidrogen més barats. No es produirà el vertader, com es pot veure segons les prediccions, fins que ens veiem sense recursos possibles per tirar endavant les nostres vides diàries, on podem disposar d'un transport privat que ens permet arribar a qualsevol destinació, el cotxe, que es

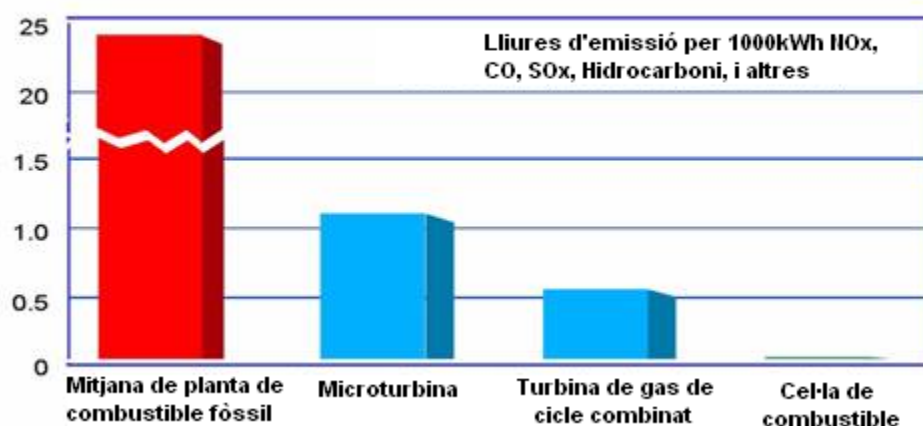
farà quan no quedi petroli? Es recorrerà a les piles de combustible, l'energia del futur.

## Vehicles d'hidrogen i convencionals

A continuació s'exposaran dues taules comparatives entre les característiques de motors de cotxe convencionals i els de pila de combustible:

Tipus	Vapor d'aigua g/milla	CO <sub>2</sub> g/milla	CO g/milla	NOx g/milla	Hydro Carbons g/milla
Gasolina ICE Passenger	176.90	415.49	20.9	1.39	2.80
Gasolina ICE Light	N/a	521.63	27.4	1.81	3.51
Methanol FCV2	113.40	68.04	27.7	1.81	3.51
Hydrogen FCV2	<b>113.40</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
Vehicle de baixa emissió	N/a	N/a	4.20	0.1	0.09
Vehicle de ultra baixa emissió	N/a	N/a	2.1	0.07	0.055
Vehicle de super ultra baixa emissió	N/a	N/a	1.0	0.02	0.01

## EMISSIONS CEL·LA DE COMBUSTIBLE



	<b>Vehicle convencional amb motor a CI</b>	<b>Vehicle amb cel·les de combustible</b>	<b>Comentari sobre les piles de combustible</b>
<b>Ambientalment net</b>	NO	SI	L'única emissió d'hidrogen és vapor d'aigua.
<b>Alt rendiment</b>	SI	SI i sobrepassen als vehicles convencionals	Els prototips actuals de vehicles de cel·la de combustible, tenen característiques de rendiment comparables o millors que els vehicles CI. Típicament, els vehicles amb cel·la de combustible són més ràpids fora de línia i comencen a mostrar major potència.
<b>Baix manteniment</b>	NO	SI	Al no tenir parts mòbils, aquests vehicles no requereixen d'oli lubricant ni manteniment en general.
<b>Fiabilitat</b>	NO	SI	Les cel·les de combustibles han demostrat ser una font de poder 99'99% fiable.
<b>Confort</b>	SI per els estàndards actuals, NO per els futurs	SI	Existeixen moltes raons per les quals els vehicles amb cel·la de combustible seran més còmodes: 1) no transmissió per un passeig suau 2) baix soroll 3)tub d'escapament net 4)més espai interior 5)més potència a bord 6)major llibertat de disseny 7)tecnologia drive-by-wire
<b>Soroll baix</b>	NO	SI	Pràcticament tot el soroll dels vehicles amb cel·les de combustible prové del compressor o dels ventiladors
<b>Alta Eficiència</b>	NO	SI	No estan limitats ni pel cicle de Carnot ni per friccions mecàniques.
<b>Llibertat de disseny</b>	NO	SI	Tots els seus components són elèctrics i estan connectats per cables. Els vehicles convencionals consten de components mecànics interconnectats. Aquest fet permet als dissenyadors moure els components del cotxe d'un lloc a un altre amb més llibertat.
<b>Potència a bord</b>	NO (Energia emmagatzemada per la bateria)	SI	Els vehicles de pila de combustible permeten alimentar altres aparells del propi cotxe i fins i tot aplicacions externes.

## Motors d'hidrogen

Existeixen dos tipus bàsics de motor de combustió que empren hidrogen com combustible:

- Motor de combustió de quatre temps.
- Motor Wankel.

### Motor de quatre temps

El disseny d'aquest motor és bàsicament el mateix que el d'un motor a gasolina, és a dir, un motor que segueix el cicle Otto, amb els seus pistons, vàlvules i altres sistemes. Aquesta classe de motors permeten aprofitar les especials característiques que presenta l'hidrogen com a combustible, per exemple:

- Alta velocitat de flama en flux laminar.
- Alt nombre d'octanos efectius
- No toxicitat i no arriba a formar ozó

Per això, amb un adequat disseny podem aconseguir un motor amb un rendiment energètic major que l'equivalent en gasolina i totalment ecològic. L'alt nombre d'octanos permet elevar la relació de compressió que redundarà en un augment del rendiment energètic, mentre que l'alta velocitat de flama en flux laminar contribueix a la reducció de les emissions de NOx, doncs és possible emprar dosatges molt baixos, tan baixos que han arribat al 0,2. Gràcies a aquesta possibilitat es pot augmentar també el rendiment. Amb tot això s'han aconseguit augments del rendiment del 25-30% respecte dels motors equivalents en gasolina.

Les prestacions d'aquest nou motor són molt similars a les que vénen oferint els motors que empren hidrocarburs com a combustible. Per a un model idèntic en cilindrada i nombre de vàlvules, obtindrem un lleuger descens de potència i velocitat màximes, i trigaria uns segons més en aconseguir els 100 km/h.

### Motor Wankel

Aquest tipus de motor és rotatiu i sembla donar bons resultats a l'emprar hidrogen com a combustible, segons ho testifiquen assajos realitzats amb dinamòmetres i una cop resoltls alguns problemes originaris d'estanqueïtat. Aquests bons resultats es deuen a que minimitza les dificultats de combustió que es donen en altres tipus de motors. El motor rotatiu no sol donar problemes d'autoenceses doncs, tal com es pot apreciar en la imatge del motor, la càmera de combustió gaudeix de la geometria adequada per a la combustió de l'hidrogen, és a dir, té una relació volum/superfície molt elevada. De totes maneres, suposant que els gasos d'escapament fossin responsables de l'autoenceses, tampoc plantejarien problemes en el motor Wankel ja que, quan els gasos frescos entren, la càmera ja és buida i els gasos d'escapament es troben lluny.

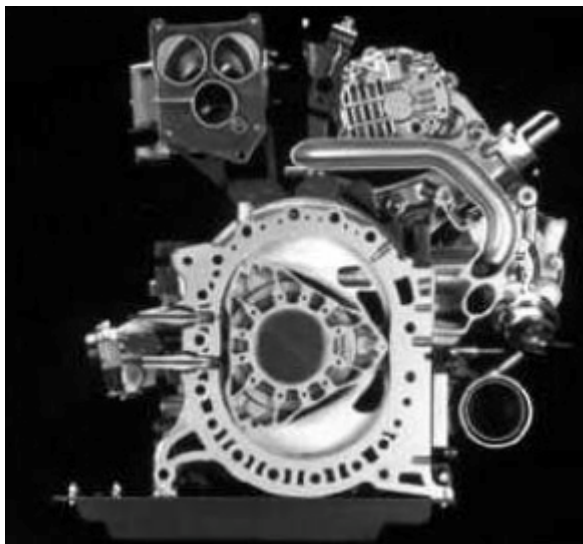
En el motor Wankel és possible l'aprofitament de l'alta temperatura d'ignició de l'hidrogen. Un altre avantatge d'aquest motor radica en la seva relació potencia/pes, ja que desenvolupa una alta potència en comparació a la seva grandària, el que permet tenir un sistema motriu d'alta potència sense emissions i de reduïdes dimensions.

No obstant això, el motor Wankel no està lliure de defectes doncs presenta problemes en el que a lubricació es refereix. L'oli emprat en la lubricació dels segells està en contacte amb la barreja de combustible i aire, amb el que, al produir-se la combustió, no només es cremarà l'hidrogen sinó que a més ho farà l'oli. Aquest fet constitueix dos problemes:

- Desaparició del lubricant, per tant el consum d'aquest augmentarà notablement.
- Emissions no 0, és a dir, l'oli al ser cremat produirà  $\text{CO}_2$  a més d'altres contaminants com poden ser els sulfurs,  $\text{NO}_x$ , etc.

A més aquesta classe de motor no posseeix la característica dels motors de pistó d'actuar com fre, posseeix l'anomenat fre motor. Un altre problema, que encara avui no ha estat resolt del tot, és el denominat dieseling. El dieseling es produeix a causa de la precisió del punt de combustió doncs, en cas de retardar-se una mica, pot ocórrer que la combustió comenci abans que el rotor giri per si mateix. En aquest cas, que se sol donar quan la velocitat és baixa, l'explosió empeny al rotor en sentit contrari al cicle de rotació i cap esperar danys en el motor.

En aquest cas també hi ha diferències de prestacions, i tot i que són acceptables són més grans que en el cas del motor de quatre temps.



## Annex IV: *Fitxa del cotxe H-racer*

### Vehicle

Aquest és anunciat com el cotxe d'hidrogen més petit del món, no necessita de piles convencionals per al seu funcionament, doncs pot generar l'hidrogen per mitjà d'energia solar. Inclou pròpia estació d'abastiment d'hidrogen de la qual pot recarregar-se com si fos de gasolina.

Aquest cotxe és una manera excel·lent d'aprendre i demostrar l'ús de les tecnologies pioneres i en ple desenvolupament del segle XXI. El seu disseny utilitza peces transparents per mostrar un funcionament intern del vehicle. Funciona amb energia 100% neta i renovable, produïda mitjançant l'electròlisi gràcies a l'energia solar o amb l'opció de bateries que ofereix.

No hi ha combustió dins la pila, l'únic que s'allibera per aquests cotxes és aigua, per això són coneguts com a vehicles amb zero emissions. Avui dia, moltes companyies com Toyota, GM, Ford, Honda i Daimler-Chrysler estan desenvolupant cotxes amb aquesta tecnologia amb la il·lusió de poder-los introduir al mercat en un futur pròxim.

L' H-Racer és una versió en miniatura funcional del que s'està investigant. Cap a la palma de la mà, conté a bord un tanc d'emmagatzematge d'hidrogen, una cel·la de combustible connectada al motor i un sistema de recàrrega connectat a l'estació externa. És molt segur i útil de fer funcionar, ja que amb una petita quantitat d'hidrogen que es generi, el cotxe pot encendre's sense problemes.



### Especificacions del vehicle:

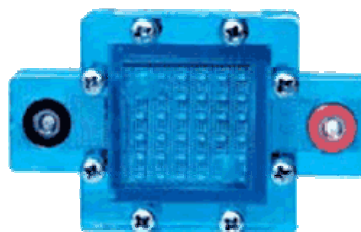
- Dimensions (mm): 63x158x45
- Rodes i llantes de carreres: 30mm
- Tanc d'hidrogen transparent
- Motor elèctric d'alta eficiència (0.6V)
- Vàlvula de recàrrega

### Cel·la de combustible

La cel·la de combustible converteix la mescla d'hidrogen i aire en electricitat i aigua. Està fabricada amb tecnologia avantguardista i a partir dels materials més avançats.

#### Especificacions de la cel·la de combustible:

- Cel·la de PEM H<sub>2</sub>/aire d'alt rendiment
- Dimensions (mm): 32x32x10
- Molt lleugera: 111,9g
- Voltatge màxim: 0.6V
- Corrent màxima: 470mA
- Poder màxim: 300mW



### Estació d'hidrogen

L'estació d'hidrogen permet abastir al cotxe amb quantitats il·limitades de combustible net i renovable. Per crear hidrogen, només fa falta agregar aigua al tanc d'estació i es produirà l'electròlisi d'aquesta generant hidrogen i aigua.

#### Especificacions de l'estació d'hidrogen:

- Dimensions (mm): 95x70x106
- Voltatge d'operació: 0.6V
- Indicador lluminós d'operació LED color blau
- Interruptor per seleccionar la font d'energia (solar o corrent altern)



### Placa solar

El panel solar converteix l'energia neta i renovable del Sol en electricitat. Aquesta impulsa l'estació d'hidrogen per tal de que la generació d'aquest sigui un procés net i renovable.

#### Especificacions de la placa solar:

- Dimensions (mm): 60x150x6
- Voltatge (punt òptim d'energia): 1V d.c.
- Corrent (màx.): 300mA
- Poder màxim: 0.5W



### Cel·la d'electròlisis

Aquesta cel·la es troba dins de l'estació d'hidrogen i serveix per generar-ne de pur. Ho fa separant les molècules d'oxigen i hidrogen contingudes a l'aigua.

#### Especificacions de la cel·la:

- Dimensions (mm): 54x54x17
- Pes total: 67.7g
- Voltatge d'entrada: 1.7-2V
- Corrent d'entrada: 800mA
- Producció d'hidrogen: 7ml per minut
- Producció d'oxigen: 3.5ml per minut



## Annex V: *Pràctiques al laboratori*

### Pràctica 3.2.1.

\*Càlculs per la preparació de 250ml de solucions 1M

NaOH (Hidròxid Sòdic)

$$250\text{ml de solució} \times \frac{1 \text{ litre solució}}{1000\text{ml solució}} \times \frac{1\text{mol NaOH}}{1 \text{ litre solució}} \times \frac{40\text{g NaOH}}{1\text{mol NaOH}} = 10\text{g NaOH}$$

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Àcid Sulfúric)

$$250\text{ml de solució} \times \frac{1 \text{ litre solució}}{1000\text{ml solució}} \times \frac{1\text{mol H}_2\text{SO}_4}{1 \text{ litre solució}} \times \frac{98 \text{g H}_2\text{SO}_4}{1\text{mol H}_2\text{SO}_4} = 24.5\text{g H}_2\text{SO}_4$$

$$24.5\text{g H}_2\text{SO}_4 \times \frac{1\text{Kg H}_2\text{SO}_4}{1000\text{g H}_2\text{SO}_4} \times \frac{0.541 \text{ solució H}_2\text{SO}_4}{1\text{Kg H}_2\text{SO}_4} \times \frac{1000\text{ml solució H}_2\text{SO}_4}{1\text{l solució H}_2\text{SO}_4} = 13.23\text{ml solució H}_2\text{SO}_4$$

KOH (Hidròxid Potàssic)

$$250\text{ml de solució} \times \frac{1 \text{ litre solució}}{1000\text{ml solució}} \times \frac{1\text{mol KOH}}{1 \text{ litre solució}} \times \frac{56\text{g KOH}}{1\text{mol KOH}} = 14\text{g KOH}$$

HCl (Àcid Clorhídric)

$$250\text{ml de solució} \times \frac{1 \text{ litre solució}}{1000\text{ml solució}} \times \frac{1\text{mol HCl}}{1 \text{ litre solució}} \times \frac{34.5\text{g HCl}}{1\text{mol HCl}} = 8.63\text{g HCl}$$

$$8.63\text{g HCl} \times \frac{100\text{g solució HCl}}{35\text{g HCl}} \times \frac{1\text{l solució HCl}}{1180\text{g solució HCl}} \times \frac{1000\text{ml solució HCl}}{1\text{l solució HCl}} = 20.88 \text{ ml solució HCl}$$

CH<sub>3</sub>COOH (Àcid Acètic)

$$250\text{ml de solució} \times \frac{1 \text{ litre solució}}{1000\text{ml solució}} \times \frac{1\text{mol CH}_3\text{COOH}}{1 \text{ litre solució}} \times \frac{60\text{g CH}_3\text{COOH}}{1\text{mol CH}_3\text{COOH}} = 15\text{g CH}_3\text{COOH}$$

$$15\text{g CH}_3\text{COOH} \times \frac{1\text{Kg CH}_3\text{COOH}}{1000\text{g CH}_3\text{COOH}} \times \frac{1\text{l solució CH}_3\text{COOH}}{1\text{Kg CH}_3\text{COOH}} \times \frac{1000\text{ml solució CH}_3\text{COOH}}{1\text{l solució CH}_3\text{COOH}} = 15\text{ml CH}_3\text{COOH}$$

NH<sub>3</sub> (Amoníac)

$$250\text{ml de solució} \times \frac{1 \text{ litre solució}}{1000\text{ml solució}} \times \frac{1\text{mol NH}_3}{1 \text{ litre solució}} \times \frac{17\text{g NH}_3}{1\text{mol NH}_3} = 4.25\text{g NH}_3$$

$$4.25\text{g NH}_3 \times \frac{100\text{g solució NH}_3}{25\text{g NH}_3} \times \frac{1\text{l solució NH}_3}{910\text{g solució NH}_3} \times \frac{1000\text{ml solució NH}_3}{1\text{l solució NH}_3} = 18.68\text{ml NH}_3$$

HCOOH (Àcid fòrmic)

$$250\text{ml de solució} \times \frac{1 \text{ litre solució}}{1000\text{ml solució}} \times \frac{1\text{mol CHOOH}}{1 \text{ litre solució}} \times \frac{46\text{g CHOOH}}{1\text{mol CHOOH}} = 11.5\text{g CHOOH}$$

$$11.5\text{g CHOOH} \times \frac{100\text{g solució CHOOH}}{85\text{g CHOOH}} \times \frac{1\text{l solució CHOOH}}{1200\text{g solució CHOOH}} \times \frac{1000\text{ml solució CHOOH}}{1\text{l solució CHOOH}} = 11.27\text{ml solució CHOOH}$$

H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (Àcid Fosfòric)

Ja s'aconseguí la solució 1M directament.

\*\*En tots els càlculs ens els quals la densitat de la solució de l'àcid no constava s'ha partit de la mateixa que l'aigua D=1Kg/1L

### Pràctica 3.2.2.

Càlculs dels potencials estàndards teòrics de reducció de les reaccions:

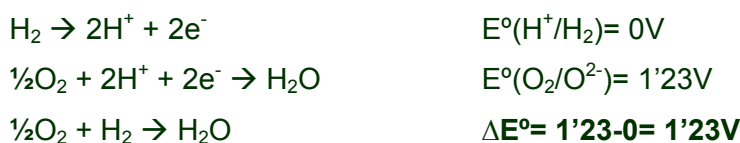
$$\Delta E^{\circ} = E^{\circ}_{\text{càtode}} - E^{\circ}_{\text{ànode}}$$

#### 1. NaOH

##### + Platí



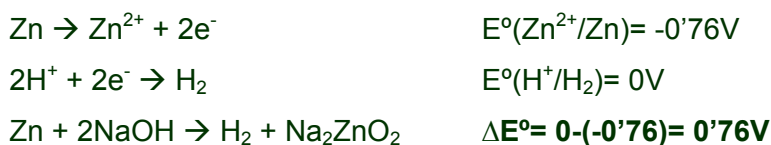
##### + Carbó



##### + Níquel



##### + Zinc



#### 2. HCl

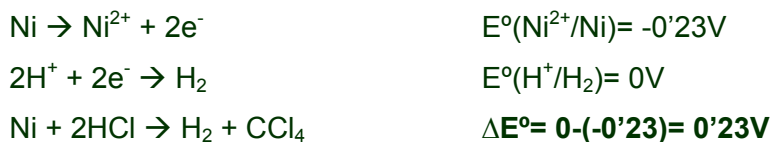
##### + Platí



##### + Carbó



##### + Níquel



##### + Zinc

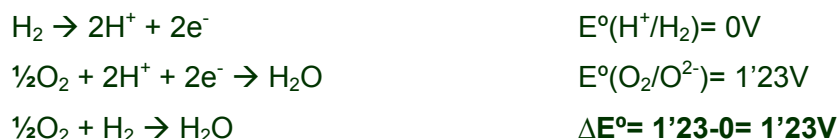


### 3. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

#### + Platí



#### + Carbó



#### + Níquel



#### + Zinc



### 4. KOH

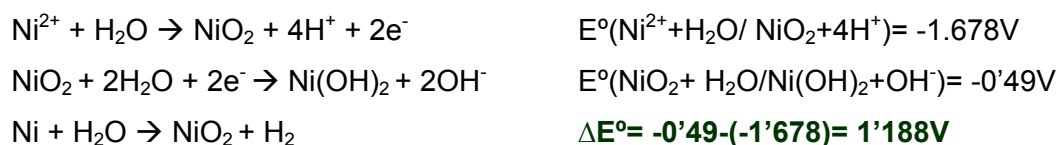
#### + Platí



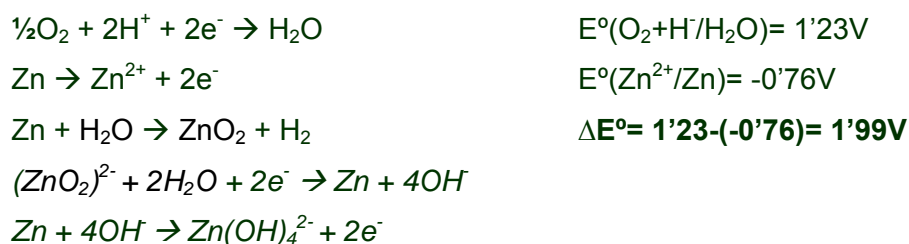
#### + Carbó



#### + Níquel



#### + Zinc



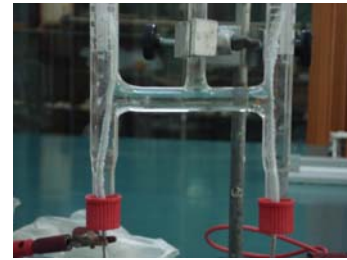
### Fotografies



NiSO<sub>4</sub>; Níquel amb H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



Zinc i Carbó amb KOH



Zinc amb HCl; ZnCl<sub>2</sub>



Níquel amb HCl; NiCl<sub>2</sub>

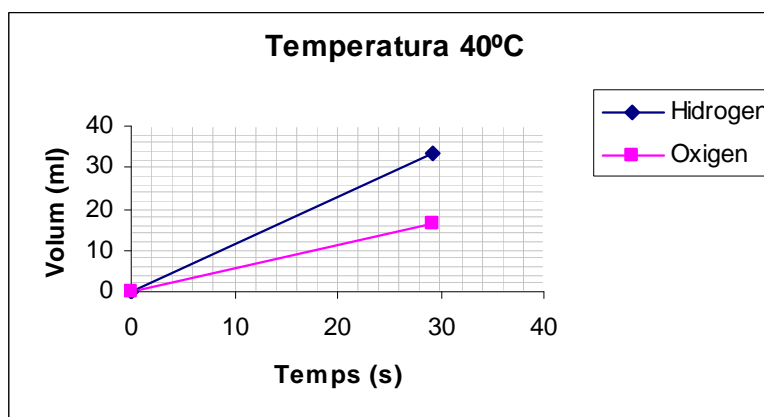
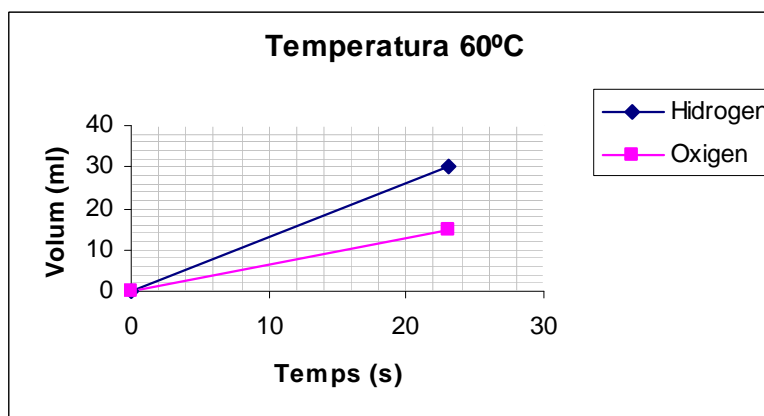
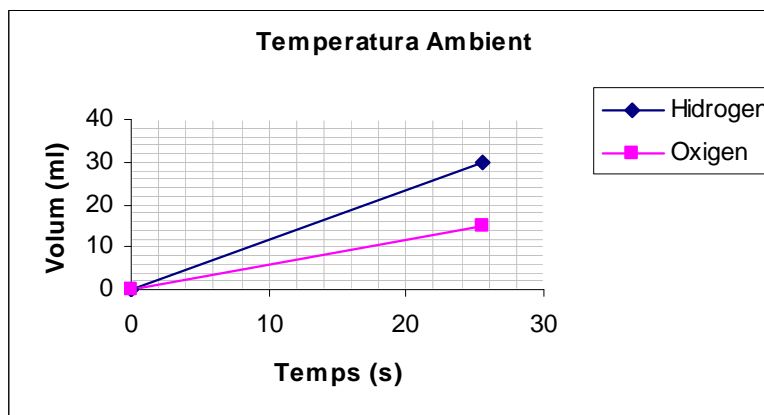


Níquel amb H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; NiSO<sub>4</sub>

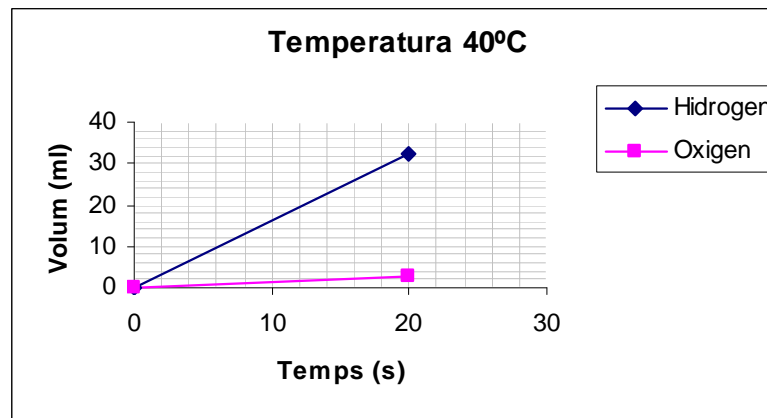
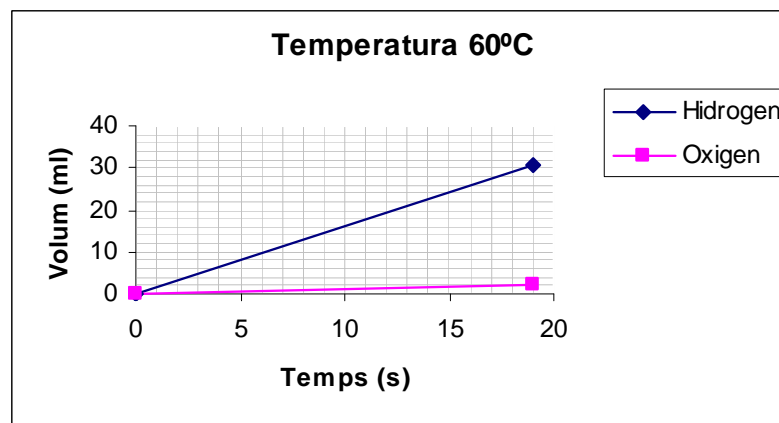
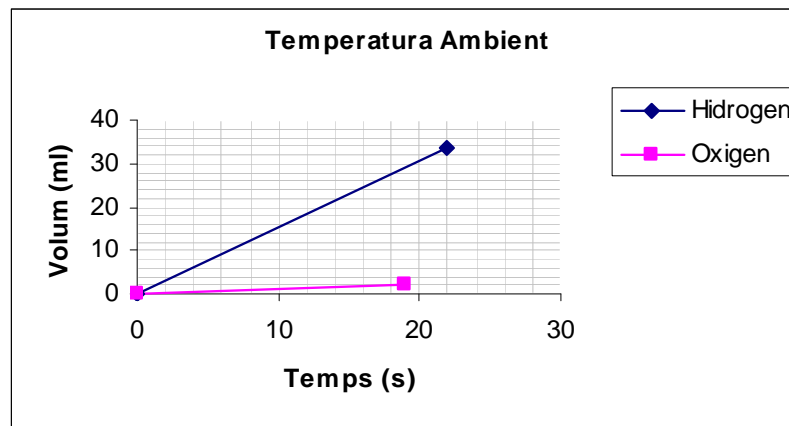
## Annex VI: Gràfics Pràctica electròlisi

### 1. Electròlit: $H_2SO_4$

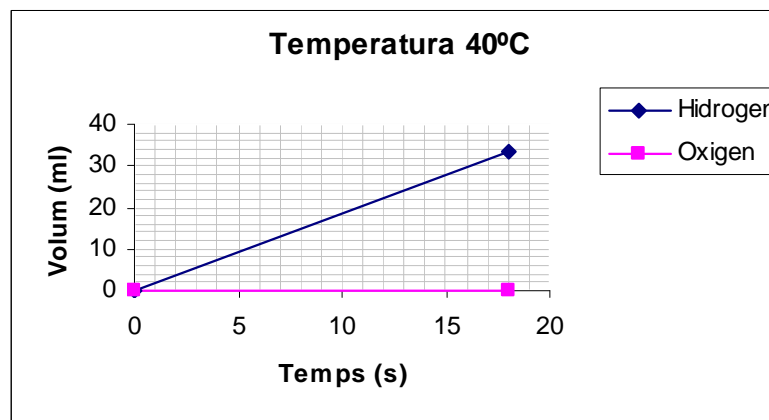
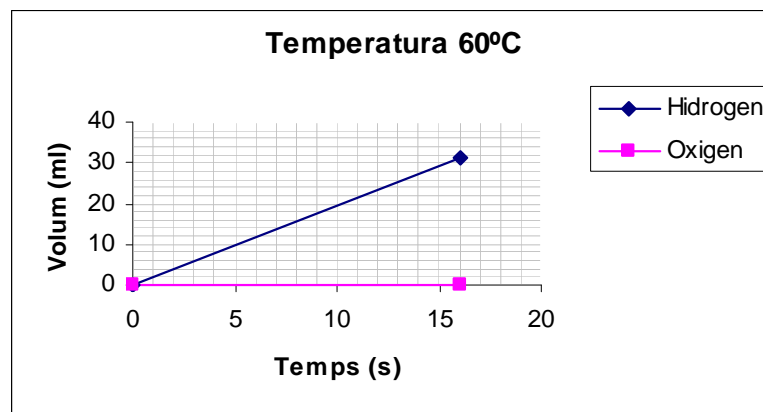
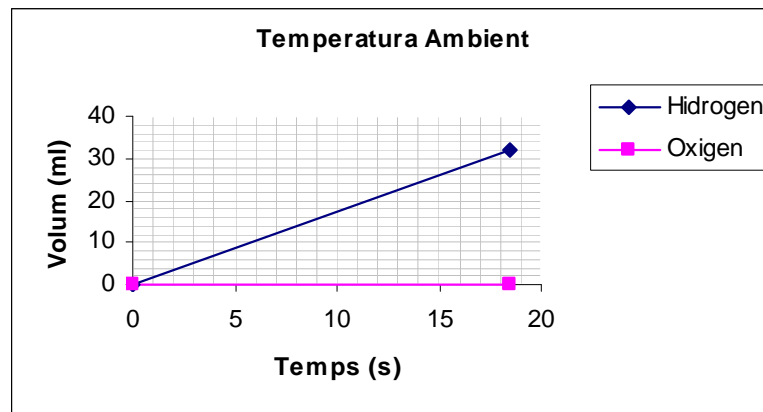
#### 1.1. Platí



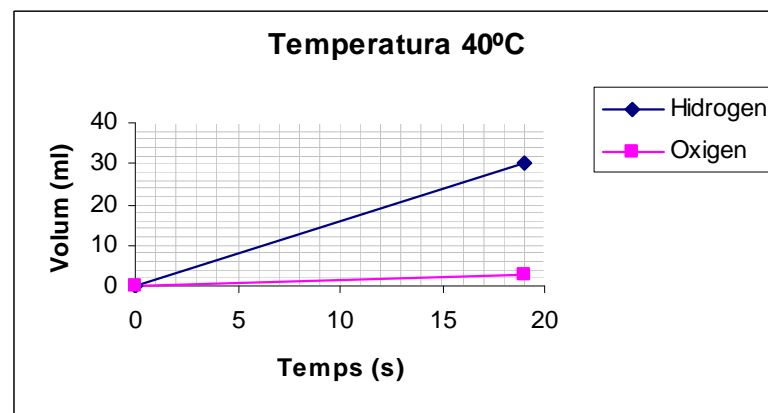
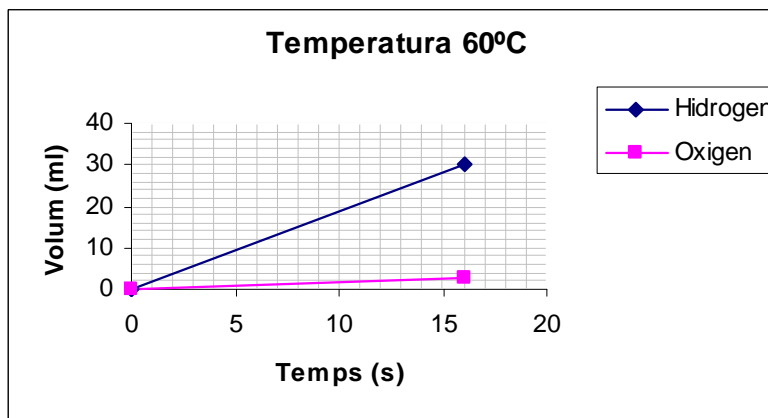
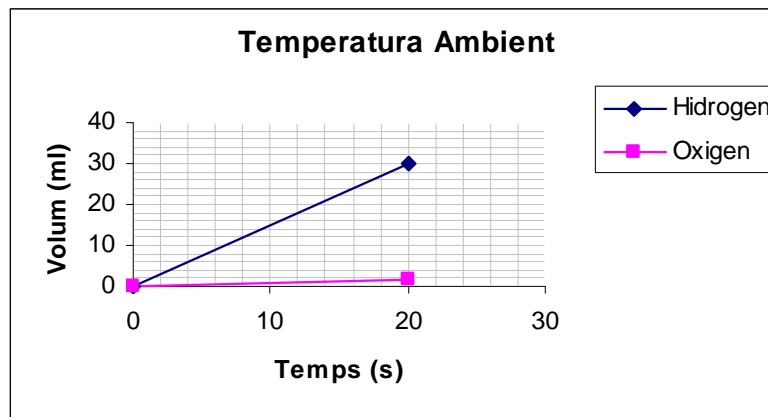
1.2. Carbó



### 1.3. Níquel

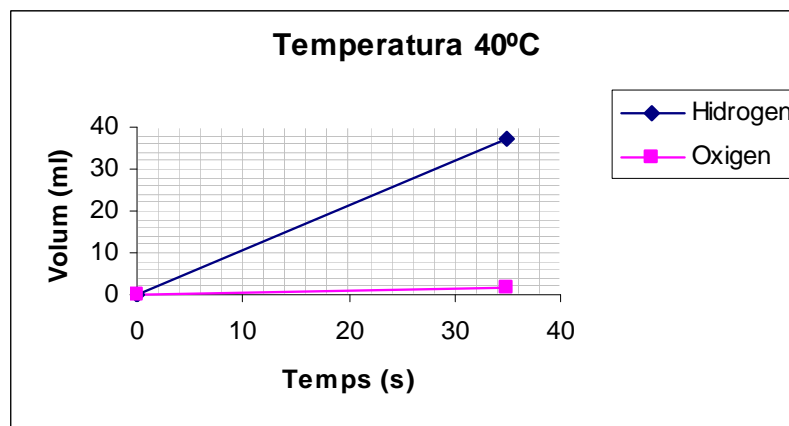
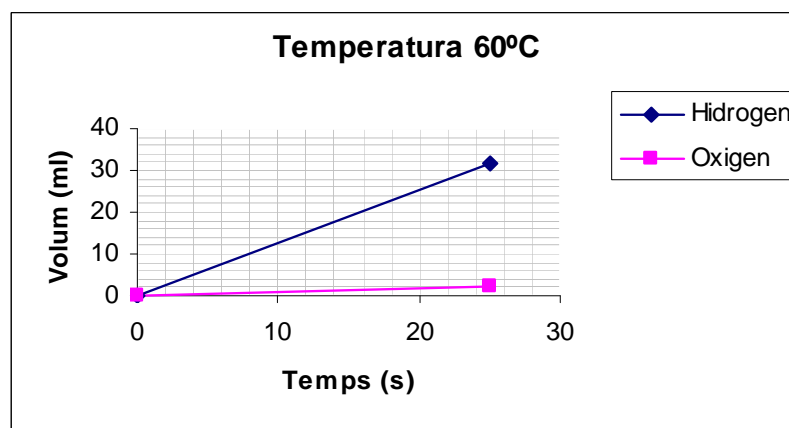
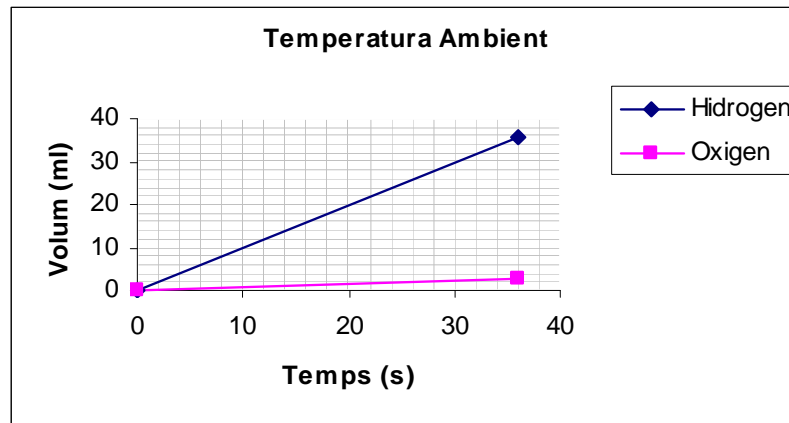


1.4. Zinc

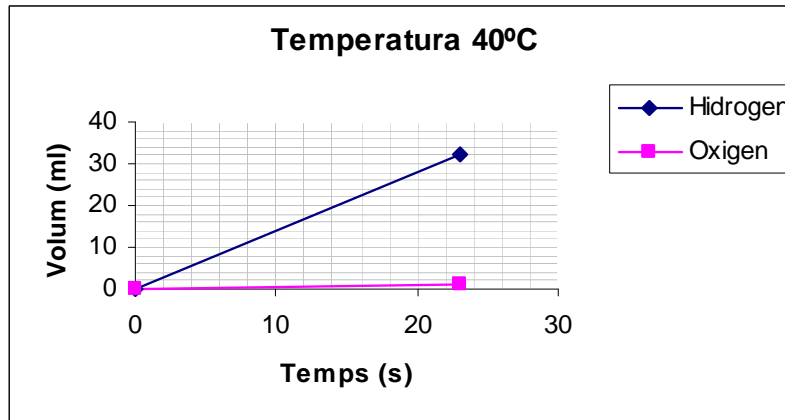
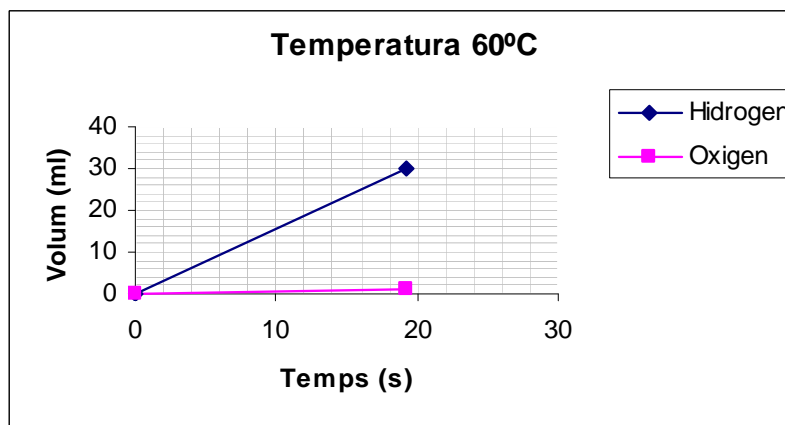
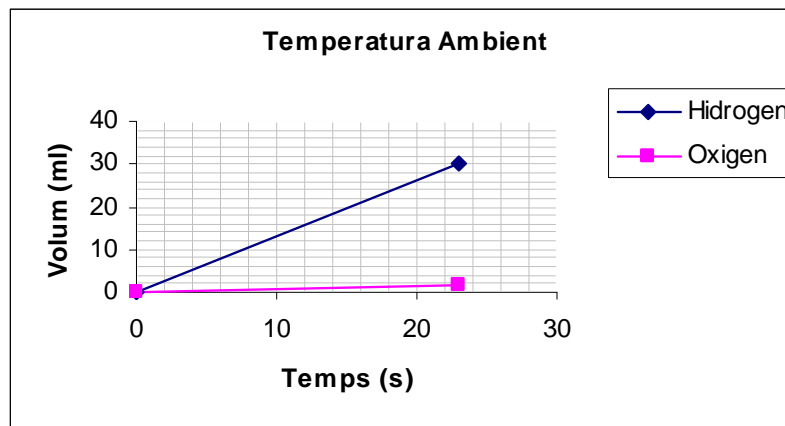


2. Electròlit: HCl

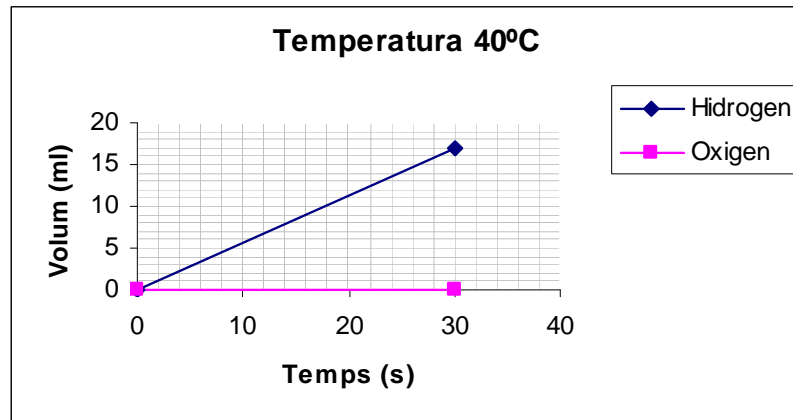
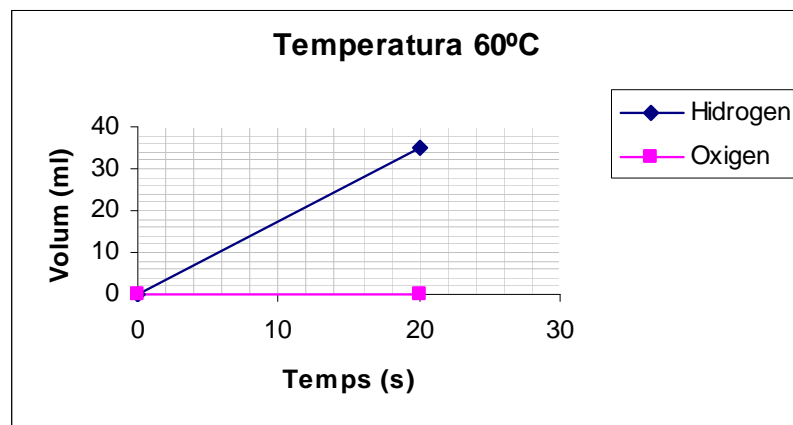
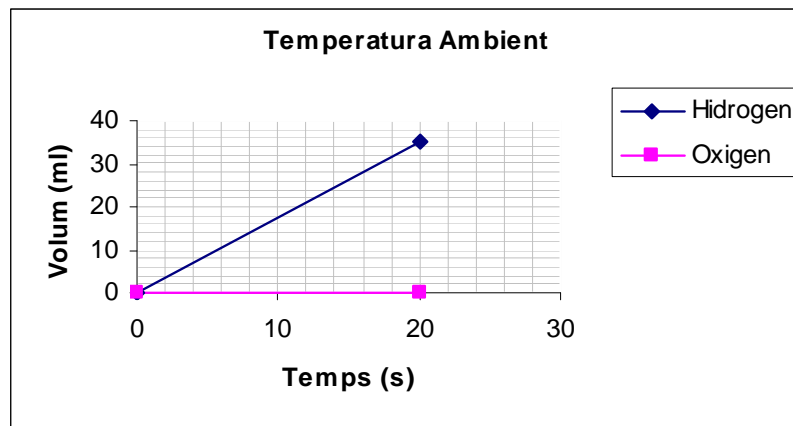
2.1. Platí



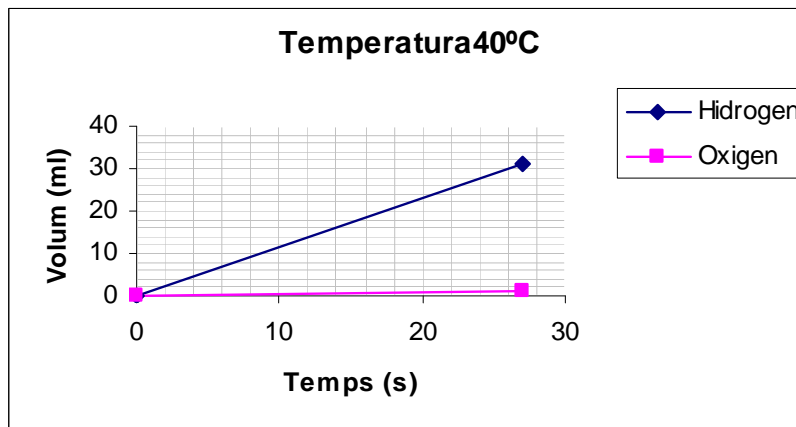
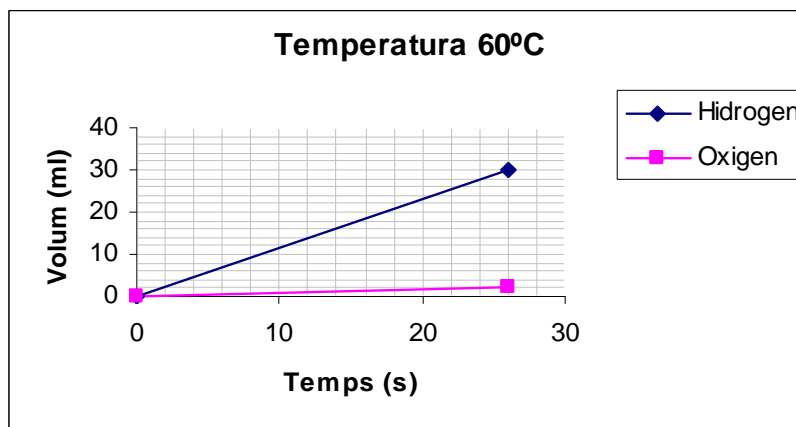
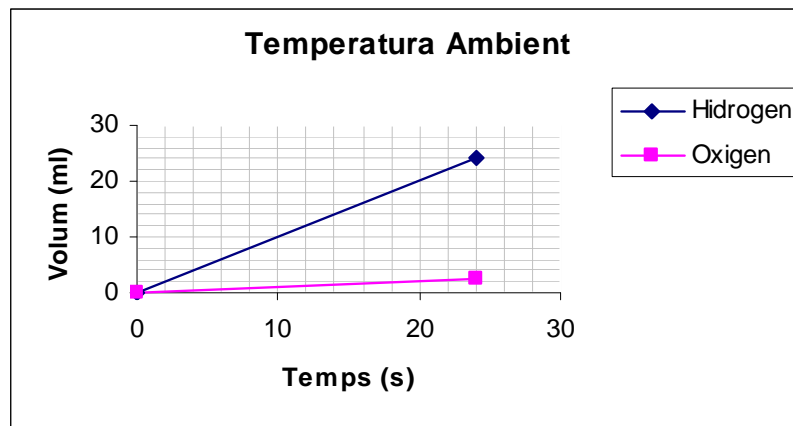
2.1. Carbó



### 2.3. Níquel

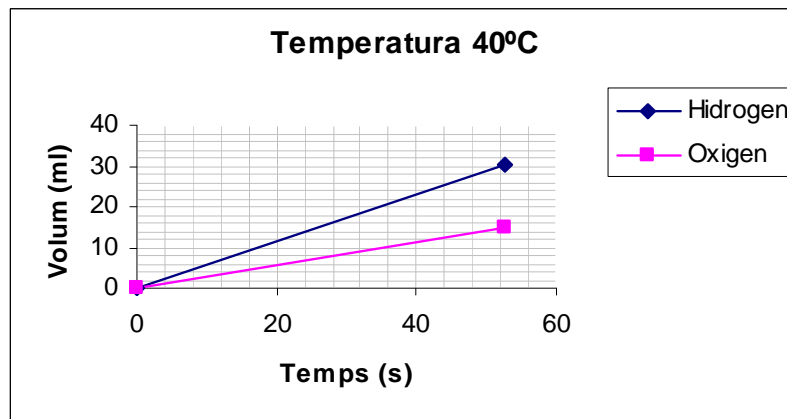
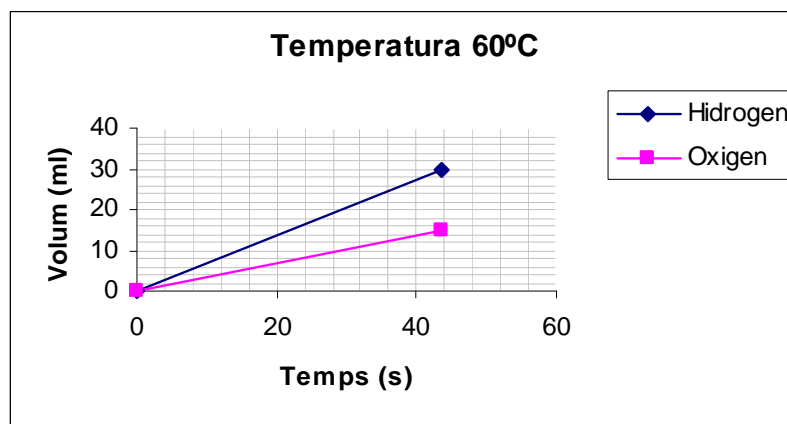
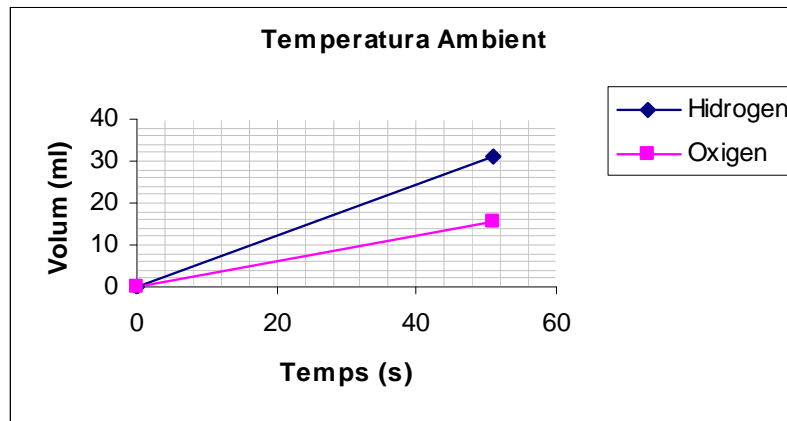


2.4. Zinc

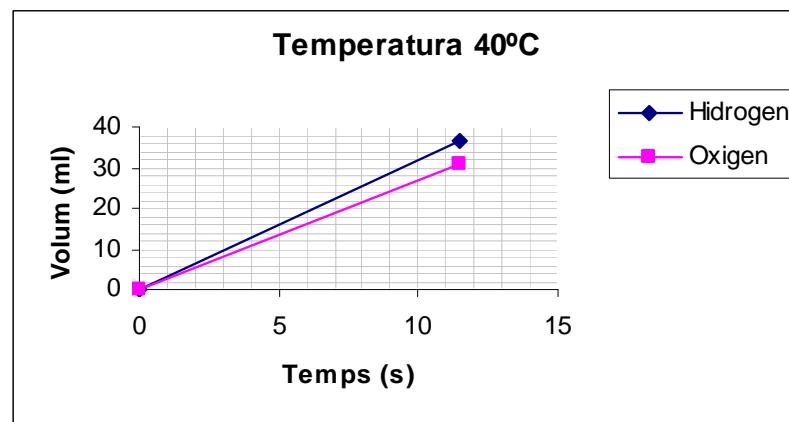
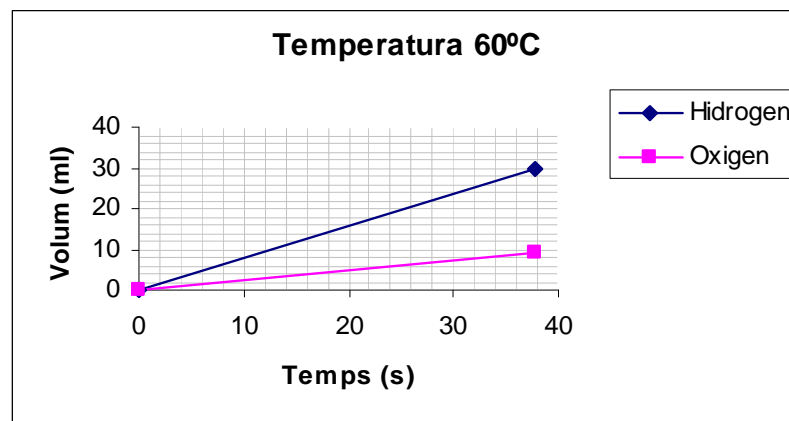
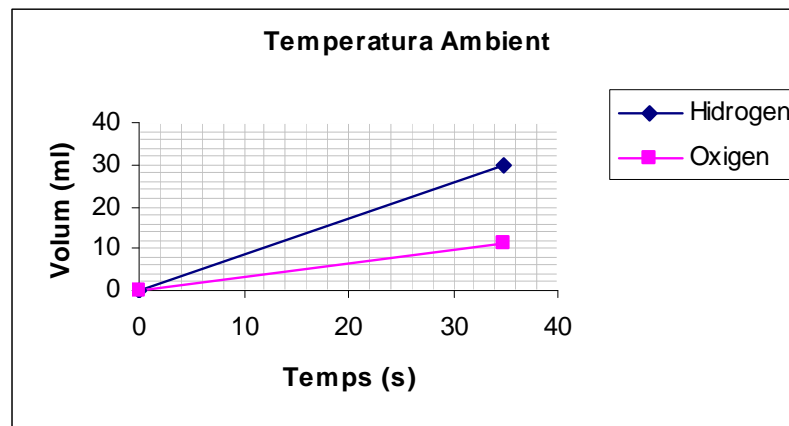


3. Electròlit: KOH

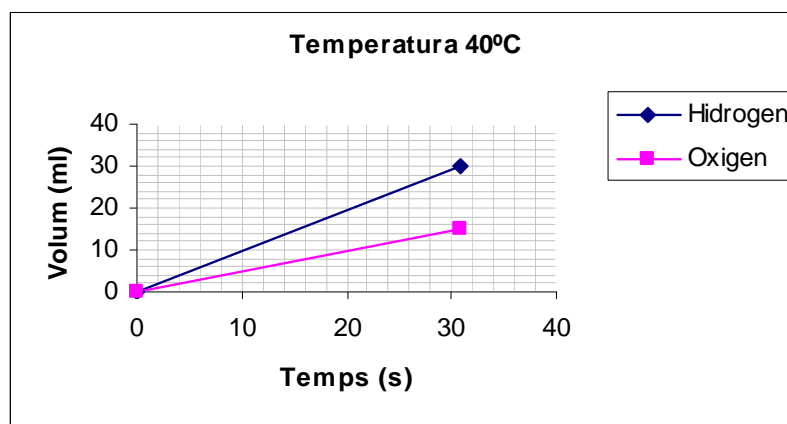
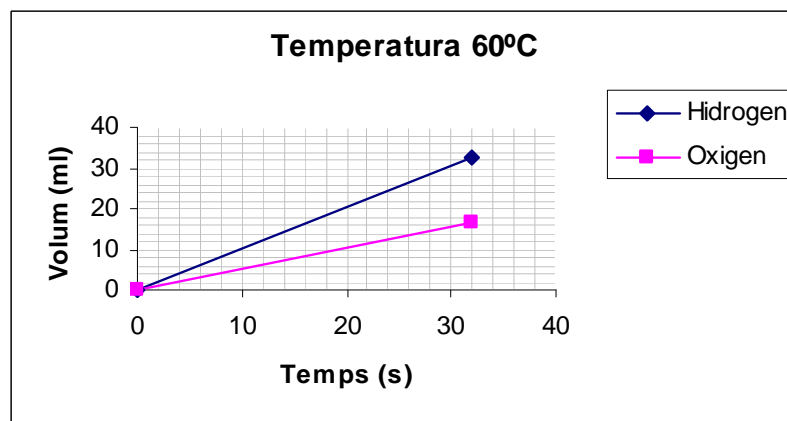
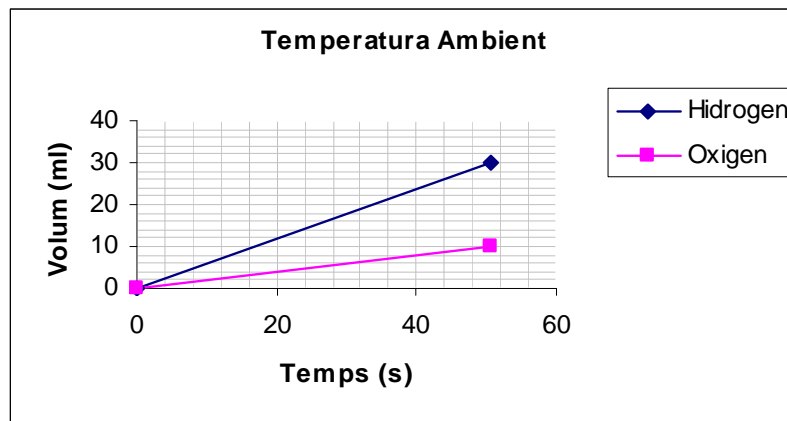
3.1. Platí



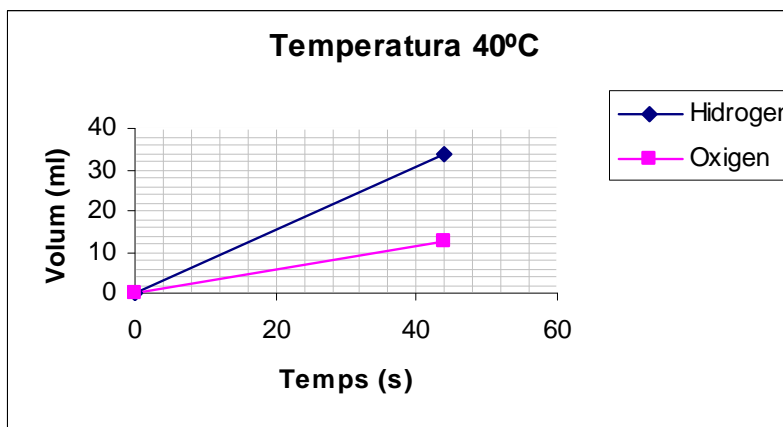
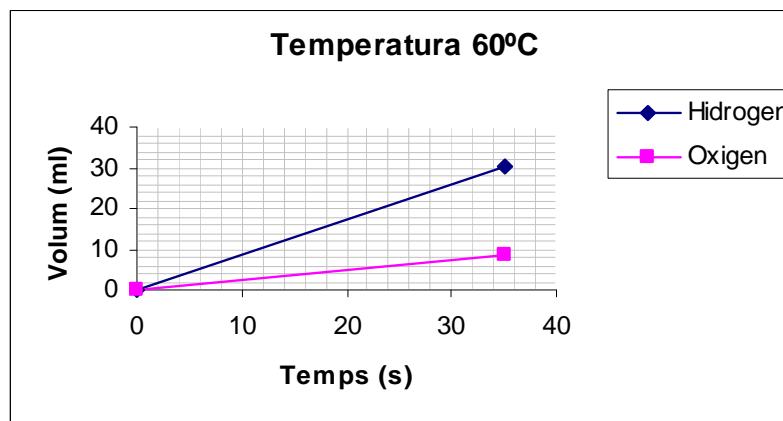
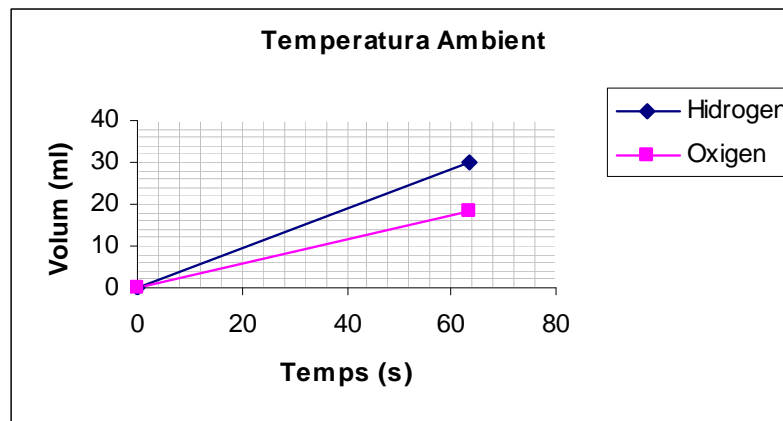
### 3.2. Carbó



### 3.3. Níquel

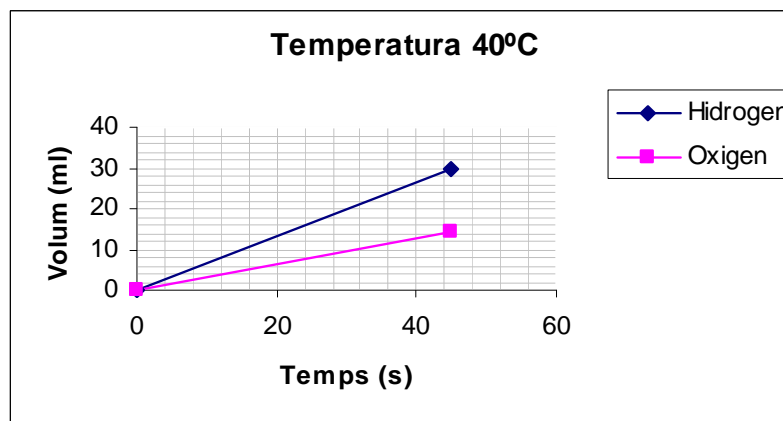
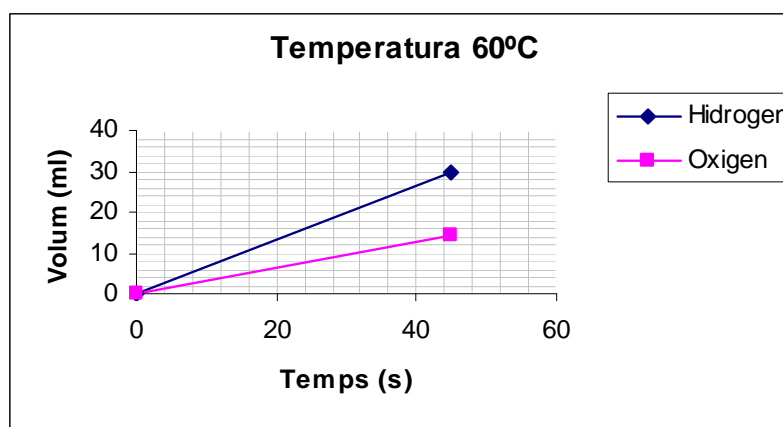
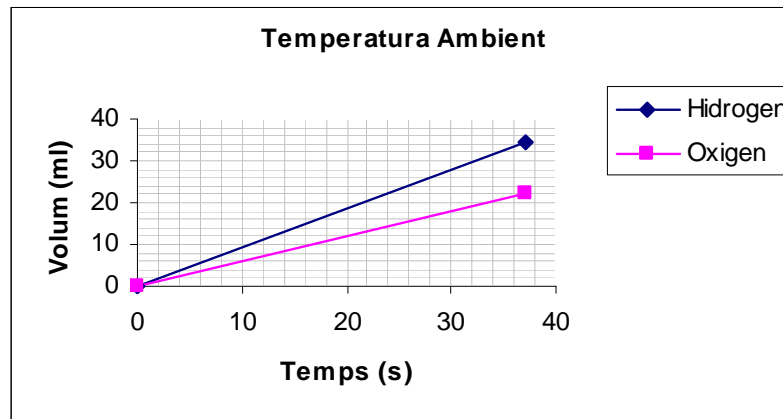


### 3.4. Zinc

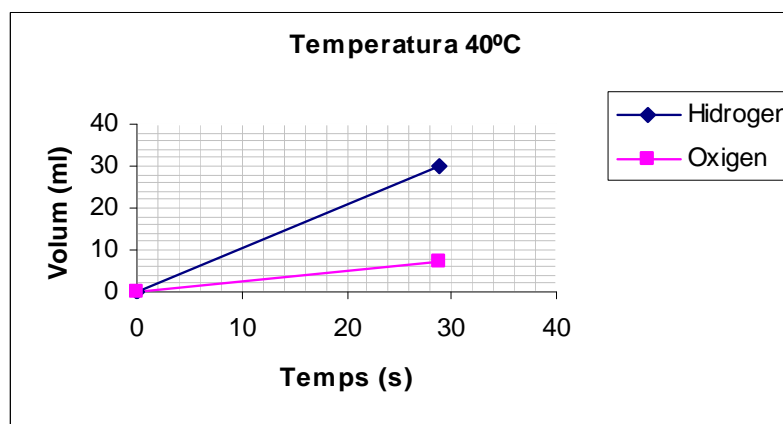
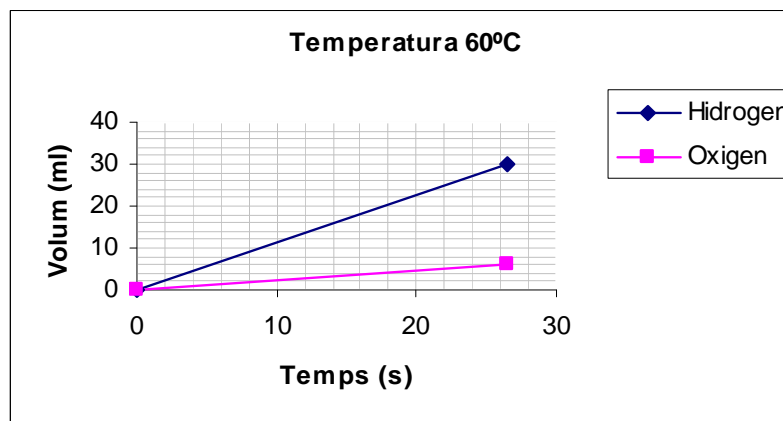
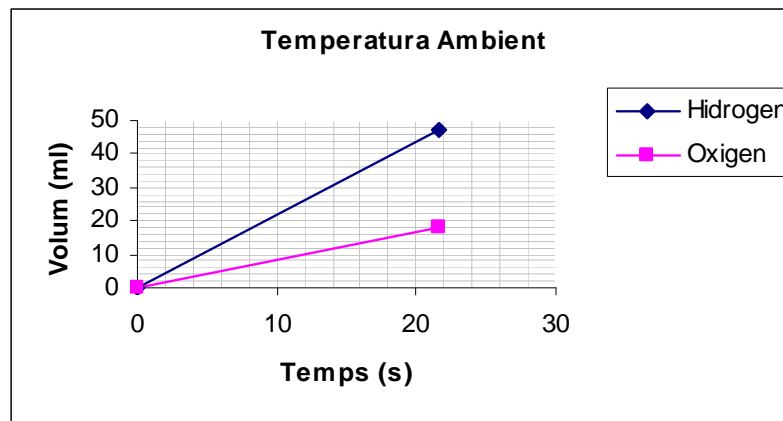


4. Electròlit: NaOH

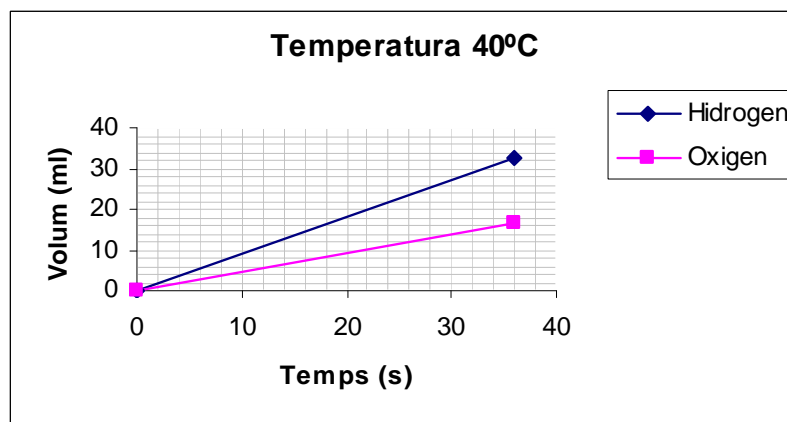
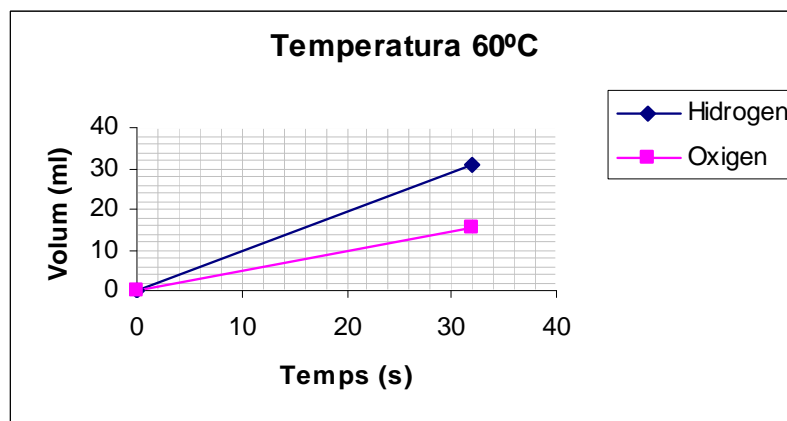
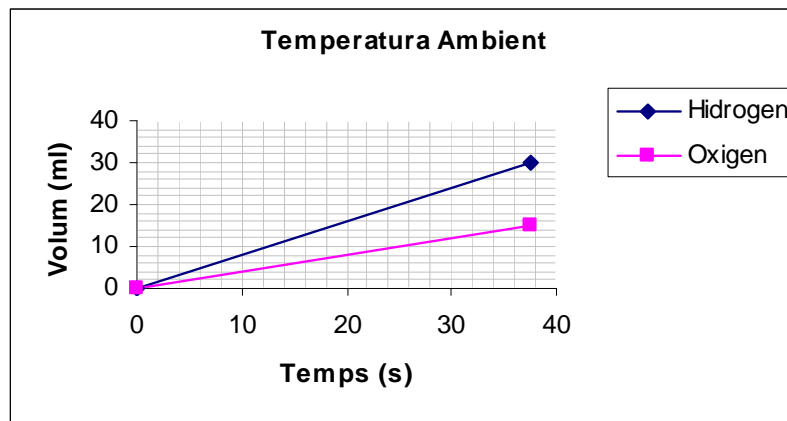
4.1. Platí



### 4.2. Carbó



### 4.3. Níquel



#### 4.4. Zinc

