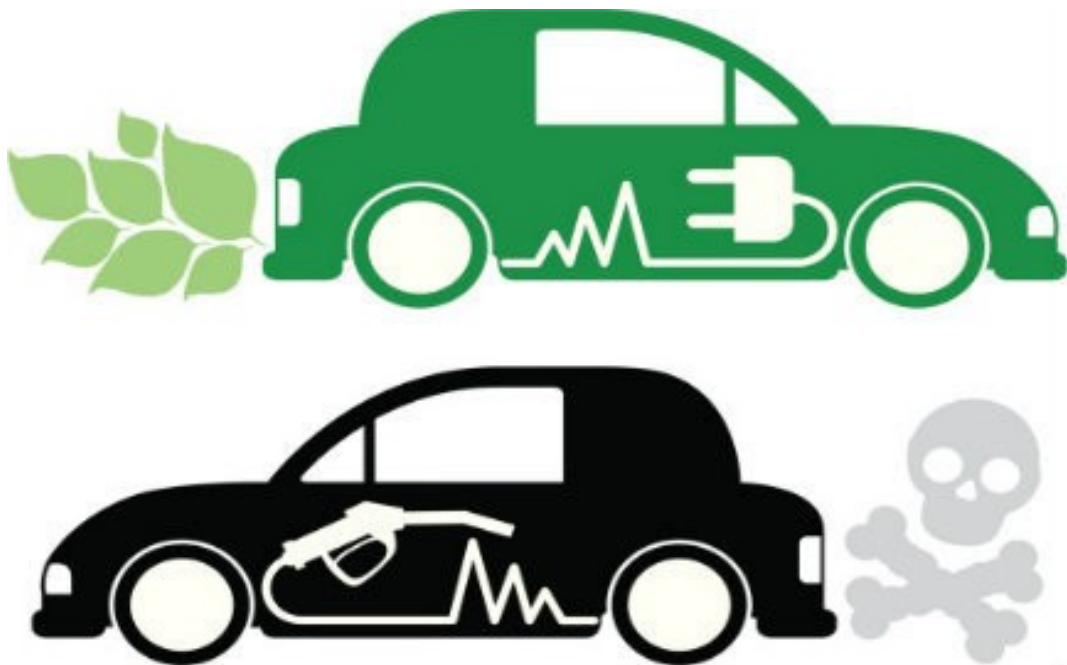


Treball de recerca

ESTUDI DE LA PILA D'HIDROGEN



Autor (pseudònim): Zikozini

Curs: 2n batxillerat

Any: 2018-2019

Imatge de la portada estreta de: Buczynski, B. *Hybrid cars live up to the hype?* [en línia]. Care2, 2013, [consulta:14 d'octubre de 2018]. Disponible a: <<https://www.care2.com/causes/do-hybrid-cars-live-up-to-the-hype.html>><https://dingo.care2.com/pictures/causes/3016/3015830.large.jpg>

RESUM

Aquest treball mostra les característiques de les piles de combustible, també anomenades piles d'hidrogen, que són uns dispositius electroquímics molt estudiats actualment per tal d'aprofitar tot el potencial que poden arribar a tenir. La hipòtesi general plantejada és comprovar si aquest tipus de piles serien els substituïts ideals dels combustibles fòssils.

En el primer bloc s'analitzen els conceptes relacionats amb la pila d'hidrogen (característiques, origen, combustible, avantatges i inconvenients...) per tal d'entendre'n la composició i el funcionament. En el segon bloc s'aprofita el coneixement adquirit a partir del bloc teòric anterior per construir una pila de combustible casolana. Amb aquesta pila i una pila fabricada industrialment (d'un kit de la maqueta d'un cotxe d'hidrogen) es realitzen una sèrie d'experiments amb l'objectiu d'observar quines són les condicions amb què la pila obté un millor rendiment. Aquests resultats es comparen amb els que és capaç d'obtenir un generador que usa combustible fòssil.

Les conclusions obtingudes indiquen que les piles d'hidrogen no contaminen i poden ser una font d'energia renovable capaç de substituir el petroli. Per altra banda, el petroli, tot i contaminar molt, segueix essent l'opció més usada pel seu preu i la facilitat de producció, que són dos aspectes amb els quals la pila d'hidrogen actualment no pot competir. Però, tot i així, els estudis actuals pretenen impulsar l'hidrogen com a combustible per a generar l'energia del futur, una energia neta i sostenible.

ABSTRACT

This work shows the characteristics of fuel cells, also called batteries of hydrogen, which are some electrochemical devices which are being studied at present to take advantage of all the potential that can be reached have. Main goal of the project is to check if this type of batteries could be the ideal alternative to fuels fossils.

In the first block, concepts related to the battery of hydrogen (characteristics, origin, fuel, advantages and inconvenient...) are analysed in order to understand its composition and operation. In the second block, taking advantage of the knowledge gained from the previous theoretical block, home-made fuel cell is build. With this battery and a battery manufactured industrially (of a kit of a hydro car model) a series of experiments are conducted with the aim to observe which are the conditions with the battery of hydrogen obtains a better performance. These results are compared to those that a generator that uses fuel fossil is able to obtain.

The conclusions obtained indicate that the batteries of hydrogen do not contaminate and can be a source of able renewable energy to substitute petrol. On the other hand, petrol in spite of contaminating a lot, continues to be the most used option because of it is cheap and easy to produce, which can not compete are two aspects with which the battery of hydrogen at present. However, the current studies aim to boost the hydrogen as a fuel to generate the energy of the future, a clean and sustainable energy.

ÍNDIX

1.INTRODUCCIÓ	6
2.ESTAT DE LA QÜESTIÓ	8
3.BLOC I: PART TÈORICA	10
3.1 Pila de combustible	10
3.1.1 Què és una pila de combustible?	10
3.1.2 Origen i actualitat de la pila de combustible	11
3.1.3 Parts d'una pila de combustible	13
3.1.4 Avantatges i desavantatges de les piles de combustible	15
3.2 Tipus de piles de combustible	16
3.2.1 Piles de combustible de membrana d'intercanvi protònic (PEM)	16
3.2.2 Piles de combustible alcalines (AFC)	17
3.2.3 Cel·la de combustible de metanol (DMFC)	17
3.2.4 Pila de combustible d'òxid sòlid (SOFC)	18
3.2.5 Pila de combustible d'àcid fosfòric (PAFC)	18
3.3 El combustible: l'hidrogen	19
3.3.1 L'hidrogen com a combustible	19
3.3.2 La producció de l'hidrogen	19
3.3.3 Distribució i emmagatzematge de l'hidrogen	20
3.4 Pila d'hidrogen	21
3.4.1 Com obtenen el combustible aquestes piles?	21
3.4.2 Com funciona una pila d'hidrogen?	22
3.4.3 Diferència de potencial estàndard de reducció	23
3.5 Com afecta al medi ambient la pila de combustible?	25
3.5.1 Situació actual	25
3.5.2 Factors determinants de la pila de combustible	25
3.5.3 Residus que generen les piles de combustible	26
4. BLOC II: PART PRÀCTICA	27
4.1 Anàlisi dels diferents tipus de pila	29
4.2 Construcció d'una pila d'hidrogen casolana	31
4.2.1 Disseny 1	31
4.2.2 Disseny 2	34
4.2.3 Disseny 3	36
4.2.4 Comprovacions	38
4.3 Anàlisi del voltatge generat, variant la temperatura	39
4.4 Anàlisi del voltatge, modificant el pH	41
4.5 Comparació entre la pila casolana, la pila del kit i un generador	44
4.5.1. Càlculs de la potència de les piles d'hidrogen	44
4.5.2 Càlculs amb la pila d'hidrogen casolana	45
4.5.3 Càlculs amb la pila del kit	45
4.5.4 Càlculs amb el generador	46
4.5.5 Taula comparativa	49
5. PROJECCIÓ DE FUTUR DE LA PILA DE COMBUSTIBLE	51
6. CONCLUSIONS	56
7. FONTS D'INFORMACIÓ, BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA	57

1. INTRODUCCIÓ

Davant d'un règim energètic que d'aquí a un temps no gaire llunyà tocarà fons, s'està intensificant la recerca d'alternatives que permetin seguir amb la qualitat de vida de les persones en el sentit energètic, ja que es consumeix molta energia i tots estem acostumats a una vida moderna i tecnològica. L'esgotament dels combustibles fòssils, com el petroli, i els problemes mediambientals que aquests generen, ha provocat que la recerca d'una alternativa vagi encaminada cap a una font d'energia renovable i que no contami ni tant com els combustibles fòssils; però no és una recerca fàcil perquè aquesta font ha de ser capaç de substituir i generar suficient energia per a satisfer les nostres necessitats.

Una alternativa a aquest problema és la pila de combustible, ja que és una opció atractiva i eficient amb grans possibilitats. Aquest tipus de piles usen l'hidrogen com a combustible i generen energia elèctrica de manera més neta i eficient que la majoria de generadors actuals.

Els humans som conscients que el nostre entorn està essent contaminat i destruït pels residus dels productes que usem. El nostre planeta està empitjorant i és vital reduir la producció d'aquests residus, ja que, si no, tot s'acabarà. El gran avantatge de les piles d'hidrogen és que no generen aquests residus, i aquest és un dels principals arguments pels quals estan essent investigades, ja que es vol innovar i augmentar-ne l'ús. És de preveure que si se n'augmenta l'ús es deixarà o es reduirà notablement l'ús de combustibles fòssils per generar energia i, per tant, els problemes que deriven d'aquests es reduiran en favor del nostre entorn.

En veure notícies sobre cotxes que usaven aquest sistema per alimentar les seves bateries i motors, em vaig començar a interessar pel tema. Tenia la curiositat de saber com i què era exactament la pila d'hidrogen.

Per aquest motiu, el meu treball de recerca consisteix en un estudi de les piles de combustible, ja que crec que és la millor alternativa als combustibles fòssils a causa del seu rendiment i, sobretot, pels residus que genera, calor i aigua, que no són contaminants ni dolents per al nostre medi ambient. He considerat especialment interessant construir jo mateix una pila d'aquestes característiques per entendre millor el funcionament d'aquests dispositius.

Aquest treball consta de dos blocs. En el primer faig una recerca teòrica sobre aquest tipus de piles basant-me en fonts d'informació bibliogràfica i d'Internet, cercant els conceptes de "pila de combustible", "electròlisi", etc. per tal de conèixer els diferents tipus de pila, origen, característiques, funcionament i, també, els principals avantatges i desavantatges.

En el segon bloc faig una investigació pràctica per comprovar, a través de la meva pròpia experiència, les característiques prèviament estudiades, a partir de l'elaboració d'una pila casolana. Abans he fet una recerca sobre diferents sistemes simples de realitzar aquest tipus de pila. També he fet servir una pila fabricada industrialment (d'un kit de la maqueta d'un cotxe d'hidrogen que usa energia renovable per realitzar l'electròlisi), que m'ha permès fer comprovacions pràctiques sobre el tema. Els resultats s'han anat comparant amb els que s'han obtingut amb un generador que usa combustible fòssil.

El treball s'inicia amb un breu estat de la qüestió, per conèixer altres estudis realitzats sobre el tema i es finalitza amb unes conclusions personals i, també, amb la interpretació dels resultats obtinguts.

La hipòtesi general d'aquest treball consisteix a comprovar si les piles de combustible d'hidrogen serien una bona alternativa als mètodes de generació d'energia actuals. Realitzant aquest treball pretenc complir els següents objectius:

- Conèixer què són les piles de combustible i com funcionen
- Identificar els diferents tipus de pila de combustible que existeixen
- Identificar els avantatges i desavantatges de les piles de combustible
- Comprovar si, mitjançant aquestes piles, es pot obtenir energia 100 % neta
- Construir una pila d'hidrogen amb materials casolans
- Determinar si és millor una pila d'hidrogen o els generadors que s'usen actualment
- Ser capaç de fer una predicció del futur d'aquest tipus de pila

2. ESTAT DE LA QÜESTIÓ

La pila d'hidrogen o pila de combustible és un sistema electroquímic amb el qual es pot obtenir electricitat directament de l'energia d'una reacció química; però aquest sistema és únic. A diferència de les piles i bateries convencionals, aquestes piles de combustible no s'exhaureixen ni necessiten ser recarregades.

Perquè aquest treball fos viable i es pogués dur a terme, s'ha fet una recerca sobre altres estudis i projectes relacionats amb la temàtica per buscar si ja n'existia algun de similar.

A partir d'aquesta recerca, s'han trobat els següents treballs, de cadascun dels quals he extret una conclusió.

1. *"Hidrogen: Aplicació en motors de combustió interna"*, de Marc Fàbrega (2009), Universitat Politècnica de Catalunya <http://www.recercat.cat/handle/2072/14199>

Aquest treball tracta sobre l'aplicació de l'element hidrogen en els motors de combustió interna i es fa un estudi sobre aquests i la seva viabilitat en el mercat. He observat que no se centra en la temàtica que vull tractar jo, i que un motor de combustió d'hidrogen i una pila d'hidrogen no és el mateix. Aquest concepte em podria haver generat confusions.

2. *"Hidrogen: Present i Futur de l'Energia"*, de David Fernandez, Mario Heredero i Ignasi Perramon (2006), IES Lluís de Peguera, Manresa

<http://www.recercat.cat/bitstream/handle/2072/4199/Hidrogen,%20present%20i%20futur%20de%20l'energia.pdf?sequence=1>

Aquest treball tracta sobre l'hidrogen com a energia, sobre com es pot obtenir, transformar i conservar; s'estudia la pila d'hidrogen i es fa un disseny i un estudi sobre el comportament de la pila d'hidrogen als canvis de temperatura, i un estudi sobre el rendiment dels dispositius de la pila. És un treball que està relacionat amb el meu, però no té exactament el mateix enfocament.

3. *"Experimentació amb electròlisi i construcció d'una cel·la electrolítica"*, de Victor Vazquez (2015), IES Francesc Ribalta, Solsona

http://www.francescribaltacat.com/joomla/images/stories/estudis/batxillerat/recerca/TR_Victor_Vazquez.pdf

L'autor enfoca el seu treball de recerca en l'estudi de l'electròlisi, un concepte que està relacionat amb la pila d'hidrogen, ja que n'és el seu principi bàsic. Observant aquest treball he vist una de les maneres amb què puc generar hidrogen, amb una cel·la electrolítica. Això ha fet

que indagué en el tema de l'obtenció d'hidrogen. Mitjançant diferents fonts d'informació, he arribat a la conclusió que no fa falta que dissenyi una cel·la electrolítica.

Un cop acabada aquesta cerca sobre diversos estudis relacionats amb el contingut d'aquest treball, s'ha constatat que no n'hi ha cap que enfoqui una recerca sobre la pila d'hidrogen amb l'objectiu que ho fa aquest, en el qual, després d'una primera part teòrica, es fa un estudi comparatiu entre una pila d'hidrogen casolana, un kit d'una pila d'hidrogen comercial i un generador, per determinar diferents característiques sobre el rendiment i la producció de residus.

3. BLOC I: PART TEÒRICA

3.1 Pila de combustible

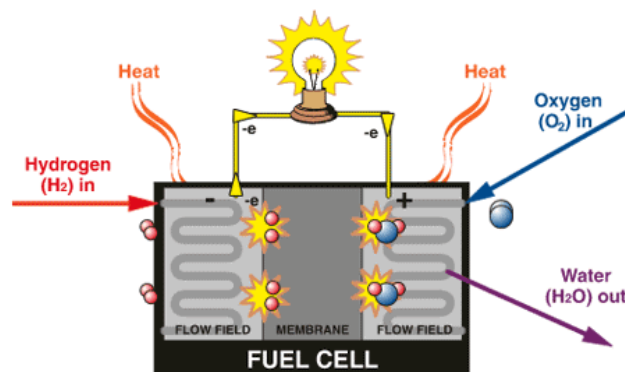
3.1.1 Què és una pila de combustible?

Una pila de combustible és un dispositiu electroquímic que converteix l'energia química dels reactius, un combustible i un oxidant, en energia elèctrica. Produeix aquesta energia mitjançant una font externa de combustible i un oxidant. Normalment s'usa l'oxigen però es poden usar altres oxidants. La producció d'energia durarà el que durin els reactius i, per tant, quan s'esgoten els reactius es deixa de produir energia elèctrica.

Les piles de combustible funcionen amb la mateixa naturalesa electroquímica que les bateries convencionals, és a dir, totes dues es basen en la generació d'energia elèctrica a partir d'energia química. La diferència és que les piles de combustible no necessiten ser recarregades sinó que treballen de manera contínua sempre que hi hagi reactius en els elèctrodes. El fet que es necessiti un flux continu de reactius és una de les principals diferències amb les bateries convencionals.

Normalment els reactius usats en una pila de combustible són l'hidrogen, que està connectat al costat de l'ànode, i l'oxigen, que està connectat al costat del càtode (això si es tracta d'una pila d'hidrogen); l'ànode i el càtode estan separats per un electròlit que fa la funció d'aïllar l'electricitat, tot i que permet el transport dels ions (partícules carregades elèctricament constituïdes per un àtom que no és neutre) entre els dos elèctrodes.

Els productes resultants en la reacció produïda en una pila de combustible d'hidrogen són aigua, calor i electricitat.



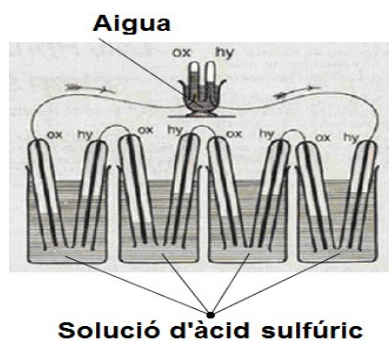
Imatge 1: Elements generadors i productes resultants en una pila de combustible d'hidrogen¹

¹Imatge extreta de: *Corrosión en pilas de combustible* [en línia]. Ingeniería de superficies y materiales nanoestructurado. Facultad de Químicas, Universidad Complutense de Madrid [consulta: maig de 2018]. Disponible a: <http://webs.ucm.es/info/tuma/quimicas_superficie/img/pilas/imagen0.gif>

3.1.2 Origen i actualitat de la pila de combustible

Tot i que bona part de la societat pot pensar que les piles de combustible són un invent molt recent i amb característiques modernes, els principis científics i tecnològics d'aquestes es van descobrir fa dos segles, molt abans que se'n poguessin imaginar les aplicacions actuals.

L'any 1839 es va fer públic un experiment que demostrava la possibilitat de generar corrent elèctric a través de la reacció electroquímica entre l'hidrogen i l'oxigen. Va ser el físic anglès William Grove qui va descobrir aquesta possibilitat. El seu experiment consistí a unir quatre cel·les electroquímiques connectades en sèrie. Cada cel·la tenia un elèctrode amb oxigen i l'altre amb hidrogen, i estaven separats per un electròlit. Grove va descobrir que la reacció d'oxidació de l'hidrogen en l'elèctrode negatiu combinada amb la reducció d'oxigen en el positiu generava un corrent elèctric que es podia usar per a generar els components anteriors: hidrogen i oxigen.



Imatge 2: Configuració del dispositiu ideat per Grove²

Tot i que Grove va començar aquests experiments l'any 1839, no va ser fins l'any 1845 que va obtenir una demostració definitiva del seu dispositiu/sistema. Però realment William Grove no va ser el primer a descobrir aquests principis, sinó que el seu experiment es basà en els descoberts per Christian Friedrich l'any 1838.

S'havien fet molts avenços i descobriments sobre els principis de les piles de combustible però l'interès per aquesta tecnologia fins ara només s'ha produït en períodes d'escassetat de recursos energètics, quan es necessitaven alternatives. Entre els anys 1970 i 1980, a conseqüència de la crisi d'un dels recursos energètics més importants, el petroli, es va investigar en el desenvolupament dels

²http://webs.ucm.es/info/tuma/quimicas_superficie/img/pilas/imagen0.gif

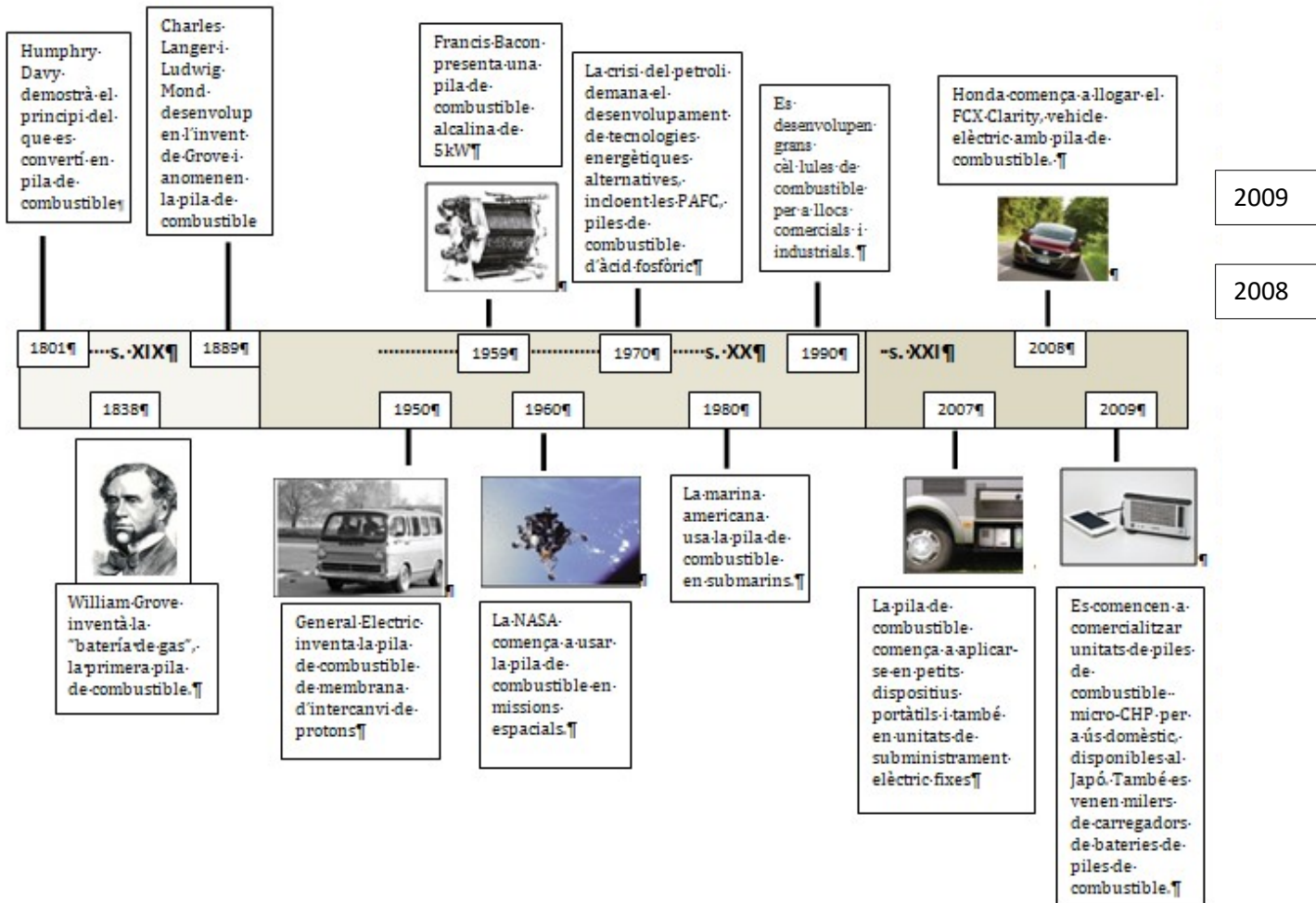
2Imatge extreta de: *William Robert Grove* [en línia]. Wikipedia, la enciclopedia libre, 26-12-2017. [consulta: maig de 2018]. Disponible a:

<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=William_Robert_Grove&oldid=104464074>

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/ce/1839_William_Grove_Fuel_Cell.jpg/220px-1839_William_Grove_Fuel_Cell.jpg

materials, fent recerca de fonts òptimes de combustible i abaratiment del cost de la tecnologia d'aquestes piles.

A partir d'aquestes dècades es va començar a investigar més sobre les piles d'hidrogen fins al punt que actualment el seu ús està relacionat amb temes d'automoció. També, cada vegada més, s'usen per a produir potència a plantes generadores i distribuir-la als usuaris. L'ús dels generadors electroquímics pot arribar a triplicar el rendiment dels motors actuals, fet que comportaria una reducció notable del consum de combustibles fòssils i dels residus que generen.



Imatge 3: Evolució cronològica del desenvolupament de la pila de combustible³

3.1.3 Parts d'una pila de combustible

³Imatge extreta (i traduïda) de: *History*. [en línia]. Fuelcelltoday.com. [consulta: maig de 2018]. Disponible a: <<http://www.fuelcelltoday.com/history>>

En aquest apartat es mostren les parts de les piles de combustible i s'explica què són els apilaments, que és un concepte molt important que hi està relacionat.

Cel·la unitària: la cel·la unitària és l'element bàsic d'un sistema format per piles de combustible. Aquestes cel·les disposen dels següents components:

Elèctrodes: la superfície dels elèctrodes és el lloc on es produeixen les reaccions electroquímiques; el combustible de la reacció s'oxida en l'ànode i en el càtode es redueix l'oxigen. Aquests components solen ser porosos per tal d'aconseguir permetre la difusió gasosa. Si és així, s'aconsegueix tenir un contacte entre les fases que participen en la reacció. Tenen les següents funcions:

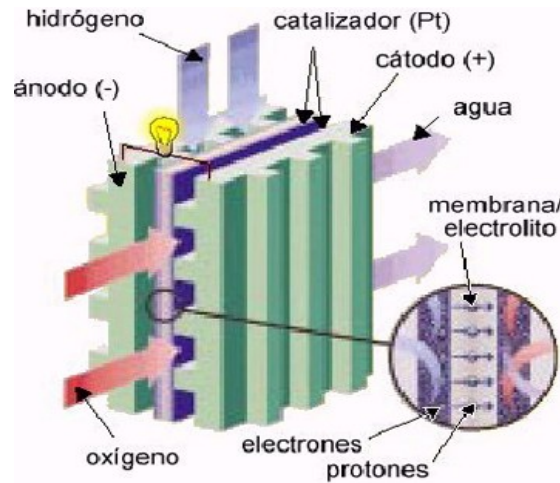
- Conduïxen o desallotgen els ions de la fase ternària.
- Asseguren que els reactius en estat gasós es distribueixin de forma uniforme en l'electròlit.
- Garanteixen que els productes de la reacció siguin portats de forma eficient cap a la fase gasosa.

Electròlit: aquest component té les funcions de conductor iònic, aïllant elèctric i separa l'ànode i el càtode. Depenent de l'estat d'agregació en què es trobi aquest component, es poden trobar dos tipus d'electròlits.

- **Electròlit sòlid:** la interfície conté un nombre elevat de catalitzadors (substància que incrementa la velocitat d'una reacció), que estan elèctricament i lògicament connectats als elèctrodes i a l'electròlit, els quals estan exposats als reactius gasosos.
- **Electròlit líquid:** els elèctrodes són porosos i mantenen contacte amb l'electròlit. Els reactius en estat gasós es difonen a través d'una capa molt fina de l'electròlit i reaccionen electroquímicament en la superfície d'aquest. La quantitat d'electròlit que pot tenir un elèctrode és limitada.

Apilaments: es combinen diverses piles de combustible en sèrie per tal d'aconseguir el voltatge de sortida adequat a l'aplicació, ja que la diferència de potencial generada per una única pila és molt petita, d'uns 0,7 V aproximadament. Les interconnexions entre les piles unitàries es realitzen amb materials amb una conductivitat elèctrica elevada. Els tipus d'apilaments més comuns tenen una estructura plana.

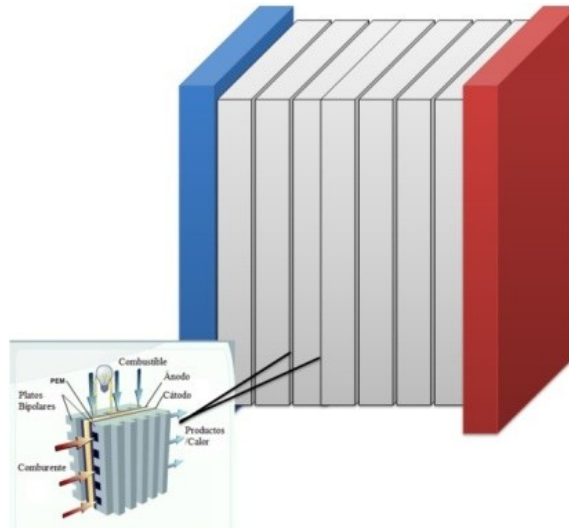
En aquest tipus d'apilament s'inclouen elements anomenat "plats bipolars". L'apilament consta de dos plats separadors situats en els extrems del sistema amb els quals fan les connexions. Un fa d'ànode i l'altre de càtode; a més a més, separen el combustible i l'oxidant en les cel·les adjacents i proporcionen un medi idoni per al subministrament dels reactius. És un disseny simple en l'apartat elèctric; el camí del corrent elèctric és curt, això fa que ofereixi poca resistència al pas dels electrons i tingui poca caiguda de tensió.



Imatge 4: Esquema de les

parts/components

d'una pila de combustible⁴



Imatge 5: Imatge d'un apilament pla

d'una pila de combustible⁵

⁴Imatge extreta de: *Piles de combustible: vehicles d'hidrogen* [en línia]. Slideshare.net, [consulta: maig de 2018]. Disponible a: < <https://www.slideshare.net/josep15/piles-de-combustible-vehicles-dhidrogen-8257529>.> <https://image.slidesharecdn.com/exposicin1-110609060846-phpapp01/95/piles-de-combustible-vehicles-dhidrogen-3-728.jpg?cb=1307599789>

⁵Imatge extreta de: *Pila de combustible* [en línia]. Wikipedia, l'Enciclopèdia Lliure [consulta: maig de 2018]. Disponible a: < https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible> <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7e/StackAma.jpg/220px-StackAma.jpg>

3.1.4 Avantatges i desavantatges de les piles de combustible

Les piles de combustible produeixen energia elèctrica de manera continuada, produint corrent elèctric útil tant de temps com se'ls proporcioni combustible i oxigen. La seva vida útil només ve limitada per la degradació dels seus components. Els avantatges principals són:

- **Alta eficiència:** rendiment elèctric cap al 37 %. Si s'aprofita la calor generada, pot arribar a tenir un rendiment global del 80 %.
- **Admissió de diversos combustibles:** es poden usar tant combustibles gasosos (gas natural) com combustibles refinats (gasolina o dièsel) i, també, combustibles orgànics (etanol o metanol). L'altre reactiu, l'oxigen, es pot obtenir de l'aire ambiental.
- **Modularitat:** la potència de les cel·les de combustible augmenta proporcionalment amb la mida de la pila, agregant noves unitats i acoblant-les elèctricament. No es necessiten grans inversions inicials, ja que es disposa de la flexibilitat de mida i d'un cost independent de l'escala.
- **Mínim nivell de contaminació:** la reacció principal que es produeix a l'interior de la pila no és contaminant, ja que s'usa aigua. Durant la producció del combustible en les piles es genera CO₂, que és un gas que produeix l'efecte hivernacle. Però, com que té una eficiència més alta que els convencionals, els nivells generats per la unitat de treball són inferiors.
- **Baix manteniment:** aquests equips estan dissenyats per tenir un manteniment baix. No tenen parts mòbils, i això fa que el major limitant de la vida útil sigui l'emmetzinament dels catalitzadors.
- **Baix nivell acústic:** com que no tenen parts mòbils, el soroll és mínim. El nivell de soroll que es detecta es produeix únicament pels equips auxiliars, com bombes o un inversor.
- **Facilitat d'instal·lació:** els costos disminueixen, ja que no es requereixen grans obres, ni infraestructures complexes per al seu funcionament.
- **Gran versatilitat:** les diferents piles ocupen aplicacions en camps molt diversos, s'usen per a petits equips portàtils però també per a la producció massiva d'electricitat.

Els aspectes a millorar de les piles de combustible són diversos, tot i que el seu nivell de desenvolupament és encara incipient. S'ha de solucionar la vida útil insuficient d'alguns equips, que es deu a la corrosió de materials causada per les altes pressions i temperatures; altres contaminants, com el monòxid de carboni, inutilitzen els catalitzadors; la fiabilitat dels equips és baixa, en canvi, tenen un alt cost, a causa de la seva escassa demanda i implantació en el mercat.

3.2 Tipus de piles de combustible

Les piles de combustible es poden classificar de diverses maneres: segons l'ús que se'n farà, segons el catalitzador usat..., però la més comuna és segons el tipus d'electròlit utilitzat. Els diferents tipus de pila operen a diferents temperatures i requereixen diferents graus de puresa d'hidrogen.

Tipus de piles:

- **Piles de combustible de membrana d'intercanvi protònic (PEM)**
- **Piles de combustible alcalines (AFC)**
- **Cel·la de combustible de metanol (DMFC)**
- **Pila de combustible d'òxid sòlid (SOFC)**
- **Pila de combustible d'àcid fosfòric (PAFC)**

3.2.1 Piles de combustible de membrana d'intercanvi protònic (PEM)

L'electròlit d'aquest tipus de pila és una membrana que intercanvia protons (partícula subatòmica amb càrrega positiva), feta d'un polímer d'àcid fluorat, conegut com a nafion. Els anions del nafion estan fixats a la matriu de l'electròlit i els protons associats estan lliures per anar de l'ànode al càtode. Els elèctrodes estan fets amb una tela de carboni porós combinat amb una barreja de platí i nafion.

Com que s'utilitza aigua, els nivells de corrosió són mínims, quasi inexistent; aquestes piles operen a temperatures baixes i poden variar ràpidament la seva producció d'energia demanada.

Característiques de les piles PEM	
Electròlit	Membrana de polímer sòlid
Catalitzador	Platí
Temperatura d'operació	80-95 °C
Eficiència elèctrica	40-60 %

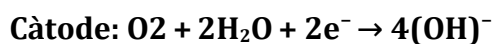
3.2.2 Piles de combustible alcalines (AFC)

Aquest tipus de pila de combustible va ser un dels primers a ser desenvolupat, a principis dels anys 60, s'usen en el sector espacial. S'usa hidrogen i oxigen, i presenten un funcionament molt bo ja que l'ambient alcalí afavoreix la cinètica química en la reacció de reducció d'oxigen a baixa temperatura.

El combustible emprat ha de complir una sèrie de limitacions per tal d'aconseguir un bon funcionament. El monòxid de carboni emmetzina els catalitzadors i el diòxid de carboni reacciona amb l'hidròxid de potassi formant carbonat de potassi i, per tant, modificant l'electròlit i inhibint la difusió del gas. Aquest últim fenomen és molt important, ja que no és admissible una proporció de diòxid de carboni tan petita com l'existent en l'aire (300 ppm). El rendiment de la cel·la disminueix amb la presència del nitrogen.

Característiques de les piles AFC	
Electròlit	Solució d'hidròxid de potassi en aigua
Catalitzador	Gran varietat de metalls preciosos
Temperatura d'operació	105-245 °C
Eficiència elèctrica	60-70 %

Reaccions en els elèctrodes:



3.2.3 Cel·la de combustible de metanol (DMFC)

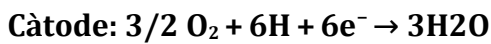
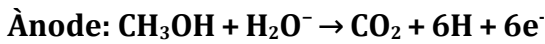
Aquestes cel·les utilitzen com a electròlit una membrana de polímer, com les de tipus PEM. Tot i així, en els sistemes DMFC el combustible no ha de passar per un reformador, ja que l'hidrogen del metanol líquid és extret per l'ànode catalitzador.

La temperatura mínima que tenen per operar és baixa, tenen aplicacions de petita mida (com carregadors de bateries). Un dels problemes que té aquest tipus de pila de combustible és que s'hauria de trobar un catalitzador de l'ànode més actiu per l'oxidació directa del metanol.

Característiques de les piles DMFC	
Electròlit	Polímer sòlid (membrana)
Catalitzador	Platí

Temperatura d'operació	50-120 °C
Eficiència elèctrica	Per sobre del 40 %

Reaccions en els elèctrodes:



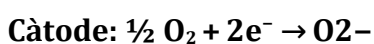
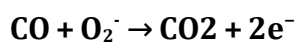
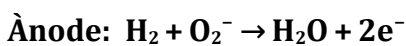
3.2.4 Pila de combustible d'òxid sòlid (SOFC)

Aquests tipus de pila de combustible d'alta temperatura estan dissenyats amb la finalitat de reformar hidrocarburs lleugers de manera interna. Es necessita un reformador extern si el que es vol és emprar hidrocarburs més pesants. Depenent del que es vulgui, la forma de la pila pot ser plana o tubular. Aquests tipus de pila tenen aplicacions estacionàries.

El problema de les piles SOFC és que operen a una temperatura massa elevada. S'està investigant per tal d'intentar reduir-ne la temperatura i millorar-ne les característiques.

Característiques de les piles SOFC	
Electròlit	Sòlid ceràmic o òxid metàl·lic no porós
Catalitzador	Material dels elèctrodes (platí no)
Temperatura d'operació	800-1000 °C
Eficiència elèctrica	Aprox. 50-60 %

Reaccions en els elèctrodes:



3.2.5. Pila de combustible d'àcid fosfòric (PAFC)

Les piles de combustible d'àcid fosfòric tenen dues opcions de combustible: poden usar biogàs o hidrocarburs. Les reaccions en els dos extrems són semblants a les de la pila de combustible tipus PEM: aquestes toleren millor les impureses del combustible però la temperatura d'operació és més alta. Les PAFC s'usen habitualment per proveir electricitat a edificis amb una demanda energètica molt alta.

Característiques de les piles PAFC	
Electròlit	Àcid fosfòric líquid
Catalitzador	Platí sobre base de carboni
Temperatura d'operació	180-205 °C
Eficiència elèctrica	aprox. 50-60 %

3.3 El combustible: l'hidrogen

3.3.1 L'hidrogen com a combustible

L'àtom d'hidrogen està format per un protó (càrrega positiva) i un electró (càrrega negativa); es presenta com un gas estable en molècules diatòmiques (H₂) en condicions normals. Aquest àtom és un gas incolor, inodor, no metàl·lic, insípid, molt reactiu i insoluble en aigua.

L'hidrogen en estat gasós és l'element més abundant de l'Univers i és un excel·lent combustible, ja que té molta capacitat per reaccionar amb l'oxigen alliberant energia. El problema que té aquest combustible és que a la Terra es troba majoritàriament formant aigua; per això l'hidrogen no és una font d'energia sinó que és un vector energètic, la qual cosa vol dir que és necessari produir-lo per utilitzar-lo com a combustible.

La reacció de combustió de l'hidrogen és la següent: **2H₂ + O₂ → 2H₂O + energia**. L'energia que s'allibera amb aquesta combustió és normalment calorífica, però amb l'ajuda de les piles de combustible d'hidrogen es pot extreure aquesta energia alliberada en forma d'energia elèctrica.

3.3.2 La producció de l'hidrogen

Tot i que la producció d'aquest combustible (hidrogen) actualment és més cara que l'ús d'altres formes d'energia, un dels seus avantatges és que pot ésser produït mitjançant diverses tècniques i mètodes.

- **Diverses reaccions alliberen hidrogen:** per exemple, s'allibera aquest combustible en reaccionar àcid clorhídric (HCl) amb un metall com l'alumini (Al). Aquesta tècnica és per a producció d'hidrogen a petita escala en un laboratori, però aplicar-la industrialment resultaria molt car a causa dels productes químics que es necessiten.
- **Fotòlisi de l'aigua:** utilitzant l'energia solar es pot obtenir directament la dissociació de l'hidrogen (combustible) i oxigen. Encara no hi ha cap manera artificial per aconseguir això, els investigadors han descobert microalgues que, si les recreen, podrien ser usades en un futur per aconseguir la dissociació.
- **Obtenció d'hidrogen a partir d'hidrocarburs:** a partir del metà (CH₄) o la gasolina, entre altres hidrocarburs, si se'ls aplica una sèrie de reaccions, es pot obtenir hidrogen que pot ser usat com a combustible.
- **Electròlisi de l'aigua:** l'any 1800, accidentalment, William Nicholson va descobrir aquesta electròlisi; Faraday, més endavant, va desenvolupar les lleis de l'electroquímica. L'electròlisi consisteix en la dissociació de l'aigua emprant electricitat.

Aquest procés es realitza usant dos elèctrodes en aigua (solen tenir una petita quantitat d'àcid o una substància iònica per facilitar la reacció) i connectant-ne un al pol negatiu i l'altre al positiu. Com que s'usa corrent continu, el pol positiu (ànode) desprèn oxigen i el pol negatiu (càtode) desprèn el combustible, l'hidrogen.



Un cop coneguts els diferents mètodes, es pot considerar que el millor per a la producció d'hidrogen és l'anterior, el de l'electròlisi de l'aigua, ja que es pot dissociar l'aigua i després en cremar aquell hidrogen amb l'oxigen obtindrem la mateixa quantitat d'aigua que teníem al principi. A més a més, l'hidrogen no contamina, ja que la seva combustió produeix només vapor d'aigua.

3.3.3 Distribució i emmagatzematge de l'hidrogen

Un dels grans desavantatges que té usar hidrogen com a combustible és que aquest component és molt reactiu i perillós si s'emmagatzema comprimit, ja que és molt fàcil que exploti. Tot i que existeix aquest perill, l'hidrogen és usat en indústria aeroespacial, comprimit en estat líquid a baixes temperatures.

Existeixen diverses maneres d'emmagatzemar l'hidrogen:

- ❖ **Gas a pressió:** opció més difosa i en la qual es té més experiència. El gas es comprimeix a uns 200 atm. aprox. i s'envasa en bombones que són distribuïdes a centres de consum. L'inconvenient principal és l'escassa energia emmagatzemada en un volum comparat amb la que s'obtindria de la gasolina. Un altre problema és el seu elevat cost energètic.
- ❖ **Forma líquida:** té aplicacions espacials i de transport. Per aconseguir hidrogen en forma líquida se l'ha de mantenir a temperatures entre 14 i 20 Kelvins.
- ❖ **Hidrurs metàl·lics:** té unes prometedores perspectives de desenvolupament. Els hidrurs metàl·lics són composts que es poden combinar amb l'hidrogen en una relació més o menys reversible. Aquesta és suficientment ràpida i arriba a una densitat volumètrica d'hidrogen altíssima.

Un dels inconvenients d'aquest combustible és que es necessita major quantitat per obtenir la mateixa energia que en el cas d'altres combustibles. També s'ha de tenir en compte que queda molt per investigar sobre l'hidrogen i que encara no s'ha descobert tot el seu potencial.

3.4 Pila d'hidrogen

3.4.1 Com obtenen el combustible aquestes piles?

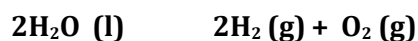
Com s'ha esmentat prèviament, l'hidrogen és el combustible d'una pila d'hidrogen. També s'ha vist que es pot obtenir de diferents mètodes i tècniques. En el cas de les piles d'hidrogen se sol usar el mètode de l'electròlisi de l'aigua, que és el procés de dissociació d'aquesta en gas oxigen i gas hidrogen utilitzant electricitat.

En aquest cas, l'electròlisi es duu a terme amb aigua destil·lada ja que és més pura. Per a poder realitzar aquest procés es necessiten estimadament uns 1,3 V (per a totes les quantitats d'aquesta) ja que s'han de superar diverses barreres d'activació.

Barrera d'activació: energia mínima que un sistema necessita per tal de poder iniciar un determinat procediment.

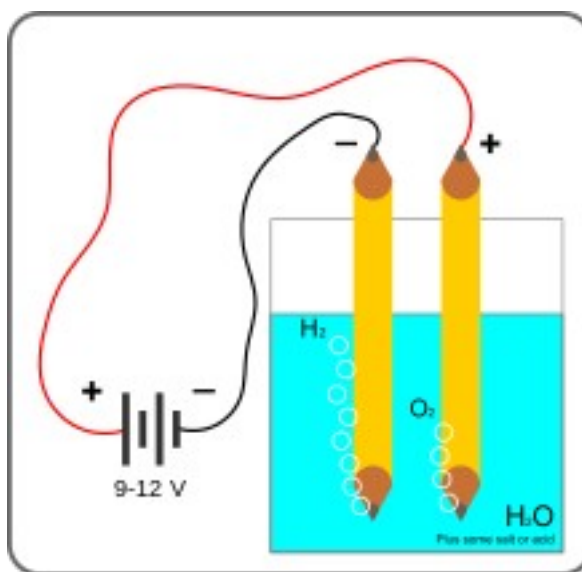
L'electricitat necessària per a fer l'electròlisi pot ser subministrada per fonts d'energia renovables. Si és així, es disminueixen els efectes contaminants sobre el medi ambient.

La reacció global que s'obté de l'electròlisi de l'aigua és la següent:



D'aquesta reacció se'n poden obtenir les següents observacions:

- El nombre de molècules d'hidrogen produïdes és el doble que el nombre de molècules d'oxigen.
- El nombre d'electrons transportats pels elèctrodes és el doble del nombre de molècules d'hidrogen produïdes i el quàdruple del nombre de molècules d'oxigen que s'han obtingut. (Observació extreta a partir de les semireaccions).



Imatge 6: Esquema que mostra el principi de l'electròlisi de l'aigua⁶

3.4.2 Com funciona una pila d'hidrogen?

L'hidrogen pur, en aquest cas, s'ha produït mitjançant l'electròlisi a partir d'una font d'energia renovable. S'ha separat l'oxigen i l'hidrogen de l'aigua destil·lada. El principi de funcionament d'aquesta pila es basa en la inversa de la reacció d'electròlisi, és a dir, l'oxigen i l'hidrogen es combinen

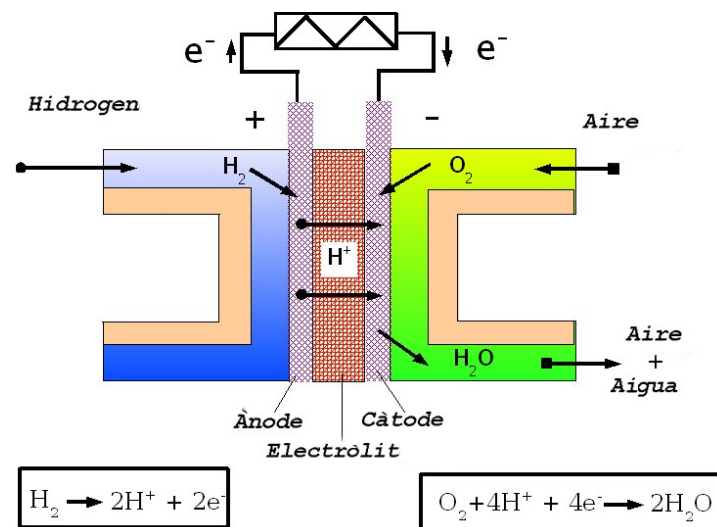
⁶Imatge extreta de: *Electrolysis of water* [en línia]. Wikipedia, The Free Encyclopedia, [consulta: juny de 2018]. Disponible a: < https://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis_of_water> <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/49/Electrolysis.svg/220px-Electrolysis.svg.png>

per formar aigua, calor i energia elèctrica. Es tracta d'una reacció neta, ja que només es produeix vapor d'aigua i aquest pot ser alliberat al medi ambient sense problemes.

L'hidrogen (H_2) penetra per l'ànode (elèctrode negatiu) i es divideix, en presència del catalitzador, en ions positius H^+ i electrons; aquests catalitzadors fan la funció d'augmentar la velocitat de la reacció. L'oxigen penetra pel càtode (elèctrode positiu) i es descompon en ions d' O_2 . Els ions positius de l'hidrogen s'escapen a través de l'electròlit (membrana) en direcció al càtode i deixen els electrons lliures en l'ànode.

Si existeix un camí elèctric entre els elèctrodes el recorren i produeixen corrent elèctric. En el càtode els ions d'hidrogen, els d'oxigen i els electrons es combinen per tornar a formar molècules d'aigua.

Mitjançant aquestes reaccions, es pot formar un cicle que combina l'electròlisi i la inversa d'aquesta, aconseguint un corrent continu, que, si es va subministrant combustible (hidrogen) i oxidant (oxigen), pot generar corrent elèctric de manera indefinida.



Imatge 7: Esquema de funcionament d'una pila d'hidrogen⁷

3.4.3 Diferència de potencial estàndard de reducció

En les semireaccions es produeix un intercanvi d'electrons i, per tant, es pot associar una diferència de potencial en aquesta semireacció. Aquesta diferència de potencial sempre s'escriu respecte a la reducció (es guanya electrons) i rep el nom de potencial estàndard de reducció.

Combinant qualsevol semicèl·lula amb un electró d'hidrogen és possible determinar el potencial estàndard d'aquesta. Alguns d'aquests potencials corresponen a reaccions d'oxidació i altres a

⁷Imatge extreta de: *Pila de combustible* [en línia]. Wikipedia, l'Enciclopèdia Lliure, [consulta: juny de 2018]. Disponible a: < https://ca.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible > <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cd/Fuelcell.es2.PNG/348px-Fuelcell.es2.PNG>

reaccions de reducció; però tots els potencials estàndards d'elèctrodes es calculen mitjançant la reacció de reducció. Per calcular els potencials dels elèctrodes s'usa un elèctrode d'hidrogen al qual se li assigna per conveni el valor de 0 Volts. Aleshores, amb el voltímetre, es mesura el potencial de la pila i, seguidament, amb el valor mesurat i el valor de l'elèctrode d'hidrogen (0 V), es pot calcular el potencial de l'altre elèctrode.

Tots aquests valors dels potencials corresponen quan la reacció es duu a terme en condicions estàndard, situacions on la pressió valgui 1 atm., la temperatura sigui de 25 ° i la concentració de les dissolucions valgui 1 M.

Tots els valors de potencial estàndard de reducció estan classificats en una taula; alguns d'aquests elements obtenen un valor negatiu, i això vol dir que, respecte a l'hidrogen, les substàncies de la dreta tendeixen a cedir electrons i les semireaccions se solen produir de dreta a esquerra.



En canvi, en el cas dels elements en què el seu potencial té un valor positiu, això significa que respecte a l'hidrogen les substàncies de l'esquerra reben electrons i les seves semireaccions solen tendir cap a la dreta.



En el cas de la pila d'hidrogen, aquesta obté un valor positiu, és a dir, les seves semireaccions van cap a la dreta i els reactius reben electrons; la reacció de l'aigua obté un valor de potencial de 1,23 V, valor que s'obté a partir dels corresponents potencials estàndard de reducció.



3.5 Com afecta al medi ambient la pila de combustible?

Per acabar el bloc teòric d'aquest treball i donar una primera resposta a la hipòtesi general proposada, cal veure com l'aplicació de les piles de combustible afecta de manera positiva o negativa el medi ambient.

3.5.1 Situació actual

Durant l'últim segle, el combustible més usat, sens dubte, ha estat el petroli, el carburant per excel·lència del progrés econòmic. La viabilitat de la societat industrial actual i la continuïtat de millores científiques, econòmiques i socials depenen de la disponibilitat d'aquesta font energètica. Del consum energètic mundial, el petroli representa aproximadament un 40 %, una xifra molt alta. Però actualment aquesta tendència està canviant; el petroli ha passat de ser un combustible barat i abundant a un combustible cada com més car i que s'esgota. Arribarà un punt que el petroli s'esgotarà del tot i s'hauran d'usar nous combustibles per tal de cobrir la necessitat energètica que aquest cobreix fins ara.

Amb aquest context social i econòmic, les característiques i els avantatges de les piles de combustible, que ja s'han comentat anteriorment, confirmen que les piles de combustible són un gran aliat del medi ambient.

3.5.2 Factors determinants de la pila de combustible

Beneficis mediambientals: les piles de combustible són silencioses i produeixen emissions contaminants mínimes, per la qual cosa es consideren una excel·lent alternativa al petroli. Les cel·les de combustible podrien reduir a gran escala la contaminació de l'aire urbà i també l'ús de combustibles sòlids.

Rendiment: com que no es tracta d'una màquina tèrmica, la pila de combustible ofereix la possibilitat d'aconseguir rendiments superiors als que es poden obtenir amb generadors tèrmics. Com ja s'ha dit anteriorment, existeixen diferents tipus de pila de combustible i cada tipus té un rendiment diferent.

Disponibilitat del combustible: el combustible, que és l'hidrogen, es pot obtenir del carbó, l'etanol, el gas natural...; en resum, de diversos carburants que continguin hidrocarburs. L'adquisició d'aquest combustible també pot ser a partir de biomassa, sistemes eòlics o bé energia solar; és a dir, a partir de fonts d'energia renovables, ja que poden ser usades en l'electròlisi.

Nivells baixos d'emissions: la cel·la de combustible produeix energia mitjançant un procés electroquímic, no a partir de la combustió i, per tant, emet aire i aigua. Un altre aspecte positiu és que, a part d'aire i aigua, emet nivells molt baixos gràcies a la neteja dels processos electroquímics.

Seguretat energètica: la dependència energètica d'alguns països és molt alta, com és el cas dels EUA, que consumeixen uns 6 milions de barrils de petroli únicament amb vehicles; si els vehicles usessin cel·les de combustible, es reduiria un percentatge bastant alt de les importacions de petroli.

3.5.3 Residus que generen les piles de combustible

Els residus que es generen es poden dividir en dos grups, segons quan s'han generat aquests residus. Per una banda, els residus generats durant la fabricació de la pila de combustible i, per l'altra, els residus generats durant el cicle de vida de la pila de combustible.

Residus de fabricació: els residus d'aquest grup són els que s'han generat durant la fabricació. Poden ser tant els materials usats com els residus generats per aconseguir aquests materials; depenent dels materials emprats, els residus que generin es podran reutilitzar o no. En el cas que siguin materials que es poden reutilitzar, es generen menys residus i menys problemes al medi ambient.

Residus del cicle de vida: com ja s'ha mencionat en apartats anteriors, durant el cicle de vida d'una pila de combustible no es genera cap residu perillós per al medi ambient; els productes generats són calor, aigua i una petita quantitat d'hidrogen que es dissipa en l'aire. En el cas que algun component de la pila es pugui degradar a causa del seu ús, s'hauria de substituir per un de nou.

4. BLOC II: PART PRÀCTICA

En aquest segon bloc s'exposa la part pràctica i experimental del treball de recerca; es mostren les diferents proves realitzades i els mètodes utilitzats per dur a terme l'estudi de la pila d'hidrogen i poder obtenir els resultats que permetin valorar la hipòtesi del treball.

Cada pràctica ha estat efectuada seguint les normes de seguretat corresponents, usant els equips de protecció personal i les mesures de seguretat necessàries per tal de no contaminar el medi ambient ni els llocs on s'han fet les proves.

Per dur a terme els diferents experiments proposats s'ha usat:

- una pila d'hidrogen de fabricació casolana (s'han fet tres dissenys fins a obtenir-ne un de satisfactori)
- una pila d'hidrogen d'un kit de fabricació industrial (que inclou un cotxe d'hidrogen, una bateria i una placa solar)
- un generador
- un voltímetre

La part pràctica es divideix en els següents sis apartats:

- **Anàlisi dels diferents tipus de pila d'hidrogen.** Realitzant aquesta investigació es pretén definir quin és el millor tipus de pila amb la finalitat de fer, posteriorment, un estudi de les seves característiques.

- **Construcció d'una pila d'hidrogen casolana.** Es construeix una pila d'hidrogen casolana a fi de determinar una sèrie de característiques de les piles de combustible i també per observar els diferents problemes que pot generar la construcció d'aquesta.

- **Anàlisi del voltatge generat, variant la temperatura.** Es realitza aquesta pràctica amb la pila d'hidrogen del kit amb la finalitat d'observar si, en variar la temperatura de l'aigua, varia el voltatge generat, i per determinar quina és la millor temperatura per operar amb la pila.

- **Anàlisi del voltatge produït, modificant el pH.** Efectuant aquesta anàlisi es pretén conèixer quin és el voltatge produït usant aigua destil·lada i comprovar si, canviant el pH de l'aigua destil·lada amb àcids i bases, s'altera la producció de voltatge de la pila. En aquesta pràctica s'ha utilitzat la pila d'hidrogen casolana.

- **Comparació entre la pila casolana, la del kit i un generador.** En aquesta secció es comparen diferents característiques de cada aparell (potència, rendiment, contaminació...) i, amb els resultats obtinguts, s'estableix quin dels tres és millor.

- **Projecció de futur de la pila de combustible.** Aquest és l'últim apartat de la part pràctica; amb els resultats/informació obtinguts es pretén realitzar una predicció del futur de l'aplicació de les piles d'hidrogen a la nostra societat. A la vegada, es destaquen les diferents característiques de les piles de combustible i els aspectes que s'haurien de millorar.

4.1 Anàlisi dels diferents tipus de pila

Després d'haver recopilat, a la part teòrica del treball, la informació dels diferents tipus de pila de combustible que existeixen, a continuació es presenta una anàlisi dels avantatges i desavantatges d'aquests per tal de decidir el tipus de pila que es construirà en aquesta part pràctica del treball i sobre la qual s'acabarà de dur a terme l'estudi més aprofundit.

DMFC: Avantatges

- Usa un combustible líquid molt proper a la tecnologia actual.
- Té una arrencada ràpida i requereix una temperatura d'operació baixa.
- Usa un electròlit sòlid (platí) i això fa que es redueixi la corrosió de les fugues.

Desavantatges

- És una classe de cel·la de combustible que està poc desenvolupada i és molt complexa.
- Usa materials difícils d'aconseguir i amb un elevat preu.

PAFC: Avantatges

- Pot arribar a obtenir una eficiència d'un 85 % si es pot aprofitar la calor i l'electricitat; també es pot usar hidrogen impur com a combustible.
- Té una excel·lent estabilitat química, electroquímica i tèrmica.
- La tecnologia que usa està molt desenvolupada i la seva fabricació és relativament senzilla.

Desavantatges

- Té un baix rendiment i una duració limitada.
- Disposa d'un volum i un pes elevat.
- Empra uns catalitzadors que són molt cars i escassos.

SOFC: Avantatges

- Per augmentar l'eficiència s'aprofita calor en turbines de gas i vapor i s'aconsegueix una alta eficiència.
- No s'usen materials nobles en els elèctrodes i això aconseguix una ràpida cinètica electroquímica, ja que els gasos nobles són elements amb una reactivitat molt baixa, és a dir, que costa molt que reaccionin.

Desavantatges

- Opera a unes temperatures altes.
- Tot i que té una baixa potència, el seu cost és molt elevat.

AFC: **Avantatges**

- Opera a temperatures relativament baixes.
- Alt rendiment, ja que la velocitat de les seves reaccions és alta.
- Usa un electròlit que és més econòmic que el de les altres piles.

Desavantatges

- Es pot contaminar per diòxid de carboni. Per impedir-ho s'han produït processos de purificació de l'aire que incrementen el cost de la pila.
- Perquè surtin rendibles han de funcionar durant 40.000 hores seguides.

PEM: **Avantatges**

- Opera a baixa temperatura però, tot i així, té una alta densitat de corrent i de potència.
- Té un arrancada ràpid i un refredament gràcies a les baixes temperatures en què opera.
- Sistema amb un manteniment molt baix i baixa corrosió.
- Llarg duració, ja que el material no es desgasta.

Desavantatges

- És intolerant al CO (enverinament dels catalitzadors) i també al CO₂, però en un grau menor.
- Usa materials nobles i l'electròlit, com que és de platí, és escàs i costós.

Per acabar amb l'anàlisi dels diferents tipus de pila, en la següent taula se'n mostren les característiques bàsiques pel que fa als electròlits, la càrrega, el combustible i la temperatura que requereixen:

Resum de característiques de les piles de combustible					
Pila	AFC	SOFC	DMFC	PAFC	PEM
Electròlit	Dissolució de KOH	Òxids sòlids	Membrana de polímers	Àcid fosfòric	Membrana de polímer (platí)
Càrrega	OH ⁻	O ²⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺
Combustible	H ₂	H ₂ , CH ₄ , CO ₂	Metanol	H ₂	H ₂
Temperatura	90-100 °C	700-1000 °C	50-100 °C	150-200 °C	50-120 °C

Finalment, el tipus de pila escollit per fer l'estudi és la PEM, ja que és la cel·la de combustible més desenvolupada actualment i la més comercialitzada. Això significa que es disposa de més informació i que els components per a la seva fabricació són més fàcils d'adquirir.

Aquesta és la pila que té un cost, un pes i un volum més inferior per tal d'obtenir una mateixa potència i aquest és un dels motius pels quals ha estat l'escollida. També té una temperatura d'operació baixa, un arrancada ràpid i el seu funcionament no requereix un gran manteniment.

4.2. Construcció d'una pila d'hidrogen casolana

Després d'haver finalitzat l'anàlisi i l'elecció del tipus de pila de combustible que es volia estudiar, la tipus PEM (pila de combustible amb membrana d'intercanvi protònic), s'ha procedit a construir-la. Seguidament, es mostren, per ordre cronològic, els diferents dissenys que s'han anat elaborant fins a arribar a la fabricació de la pila definitiva. En l'explicació també s'exposen els problemes i les dificultats sorgides durant els processos de construcció.

4.2.1 Disseny 1

El primer disseny parteix d'un experiment consultat a Internet que requeria l'ús d'un filferro de platí com a electròlit. Després de consultar diferents establiments físics i webs on poder adquirir aquest filferro, es va poder comprovar que era un material molt costós i quasi impossible de trobar en quantitats petites per a ús no professional; aleshores es va intentar buscar alguna alternativa possible. En diferents llocs de la xarxa es recomanava com a probable substitut el filferro d'acer inoxidable de qualitat.

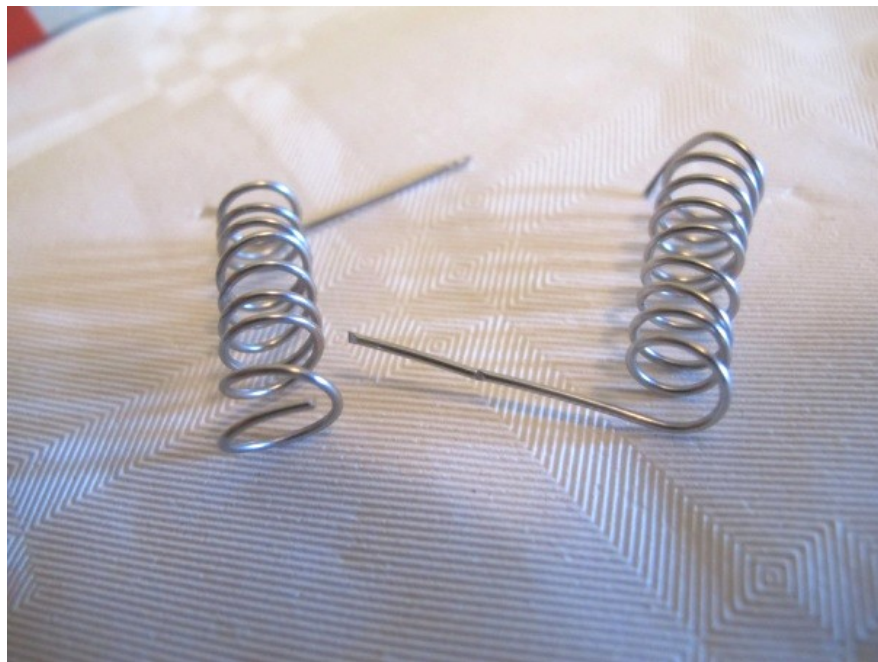
Un cop obtingut aquest material alternatiu, es va procedir a posar en pràctica la construcció de la pila seguint les indicacions de l'enllaç esmentat. Aquest disseny consistia a elaborar dues espirals amb el filferro, unint-les amb cablejat elèctric a una pila de 9V mitjançant un clip de bateria (per a poder provocar l'electròlisi de l'aigua) i subjectant-los a un depressor lingual que reposava sobre el perímetre d'una copa quasi plena d'aigua destil·lada, de manera que els elèctrodes no es tocaven entre ells ni els cables tocaven l'aigua (veg. imatge 11).

Per iniciar l'electròlisi, la pila de 9V es connectava uns cinc segons al circuit i, un cop desconnectada, es mesurava amb el voltímetre el corrent generat per la pila de combustible. El resultat d'aquest primer disseny no va assolir les expectatives ja que el valor obtingut va ser quasi nul (aproximadament d'uns 0,12 V).



Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatge 8: Material utilitzat en la construcció de la pila d'hidrogen casolana, segons el disseny 1



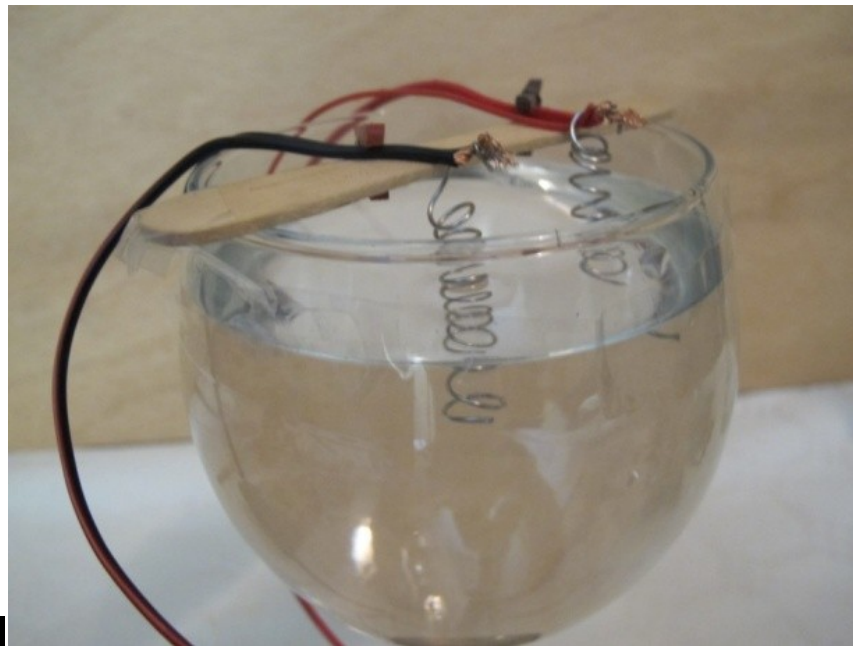
Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatge 9: Material usat per a fer l'electròlit en el disseny 1



Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatge 10: Clip de bateria connectat a les espirals
(subjectades a l'espàtula de fusta)



Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatge 11: Disseny 1 final

4.2.2 Disseny 2

Vist que els resultats del primer disseny no van ser satisfactoris, es va seguir amb la recerca sobre altres sistemes per a la construcció de cel·les de combustible casolanes. En diferents enllaços es constatava que el filferro d'acer inoxidable no rendia correctament i es proposava l'ús d'un altre electròlit, també a base d'acer inoxidable però amb una major superfície (un fregall). Amb aquesta modificació variava el disseny de la pila: el continent passava de ser una copa a un recipient més ample per poder contenir els dos fregalls evitant el contacte entre ells i també s'eliminava l'ús del depressor lingual ja que, en aquest cas, els cables s'introduïen al fregall.

Seguint les indicacions d'aquestes noves propostes consultades, es recomanava afegir a l'aigua destil·lada una dissolució de NaOH per tal d'incrementar el corrent generat. En connectar el voltímetre, el corrent elèctric havia augmentat (0,3 V) però va sorgir un important problema: també es generava òxid atès que probablement el fregall no era d'un acer d'alta qualitat (veg. imatge 16).

Abans de donar per acabat el segon disseny, es va decidir canviar el medi del recipient, tenint en compte que en el primer disseny s'havia usat només aigua destil·lada. Així doncs, es va repetir el segon disseny de manera idèntica però, en aquesta segona versió, només amb aigua destil·lada, sense la dissolució de NaOH, per tal de comprovar si el medi afectava la producció de corrent. En aquesta nova versió es van assolir uns millors resultats que amb la dissolució de NaOH (0,5 V).



Fotografia: Mr. Kaydy Cain

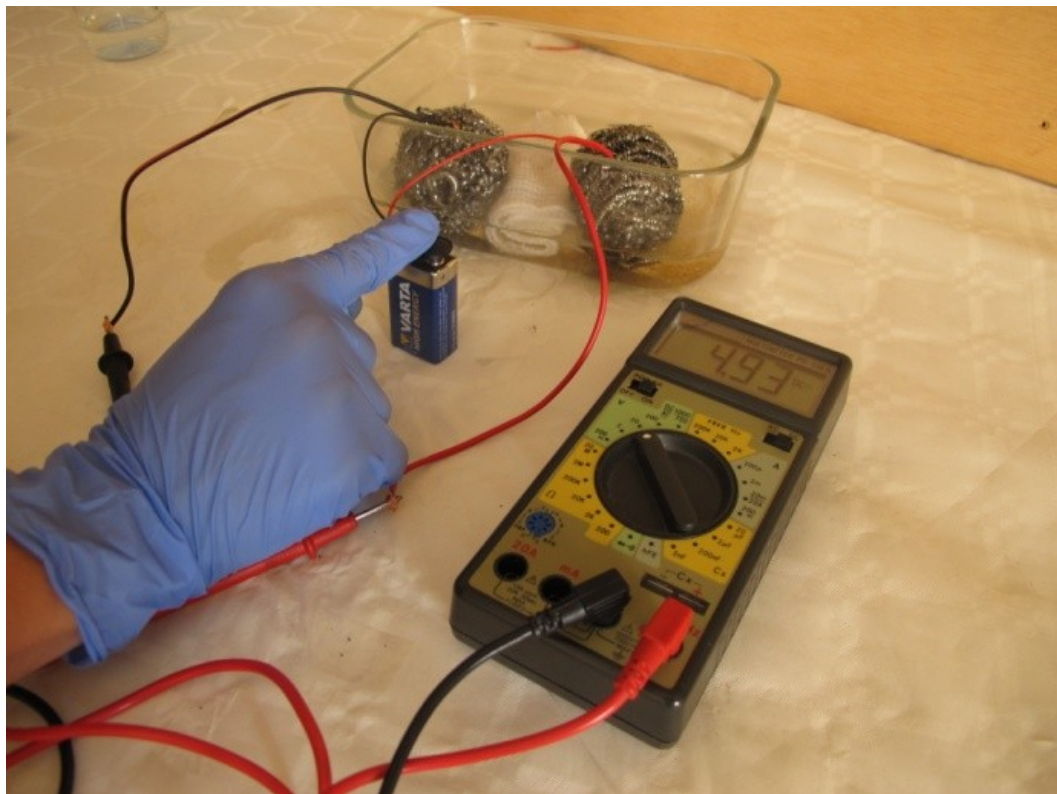
Imatge 12: Material utilitzat en la construcció de la pila d'hidrogen casolana, segons el disseny 2



Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatges 13 i 14: Introducció de la dissolució de NaOH al recipient (amb aigua destil·lada) del disseny 2



Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatge 15: Disseny 2 connectat a la bateria i al voltímetre



Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatge 16: Formació d'òxid en el disseny 2

4.2.3 Disseny 3

Valorant les diferents mesures obtingudes en els disseny 1 i 2, que no havien assolit les expectatives previstes, es va plantejar la possibilitat d'aconseguir un millor resultat, en un tercer disseny. Les proves anteriors feien evident que l'electròlit és la part més important de la pila i, per tant, es va optar per trobar un producte que, de manera garantida, estigués format per acer inoxidable de qualitat (ja que els acers usats anteriorment no oferien informació comercial sobre la composició del producte). En una ferreteria es van localitzar diferents elements fets amb acer inoxidable, segons se certificava en l'etiquetatge de fabricació, entre els quals es van triar unes brides, de gruix considerable, que tenien un forat a cada extrem (veg. imatge 17), la qual cosa facilitaria la connexió dels cables.

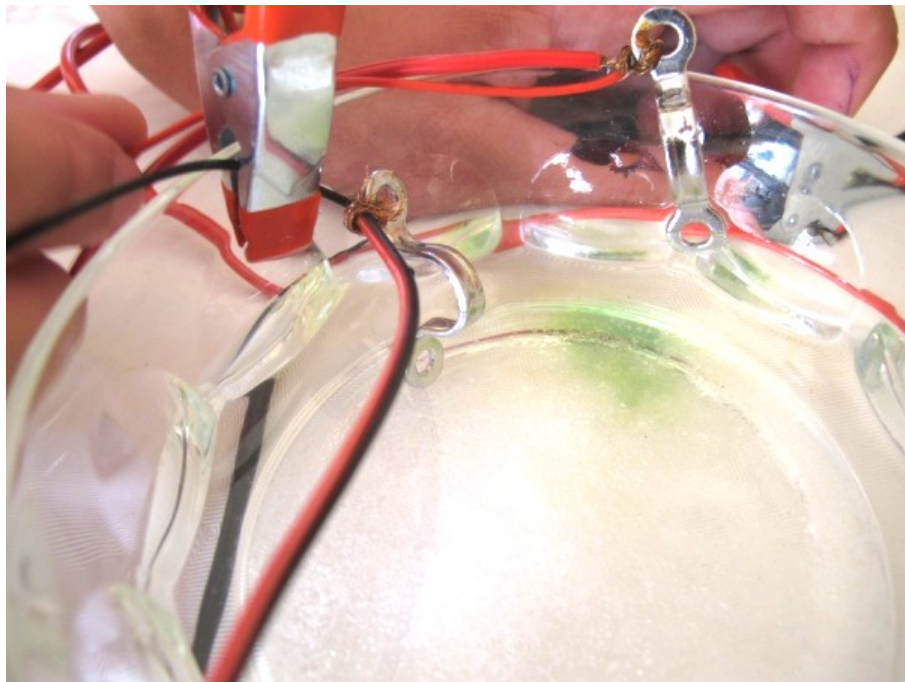
Així doncs, en aquest tercer disseny, es va prendre com a base el disseny 1 però usant les brides d'acer inoxidable com a electròlit; per evitar la incomoditat de subjectar el circuit emprant el depressor lingual que havia de reposar sobre el recipient, aquest es va substituir per unes pinces.

Pel que fa al medi del recipient, en aquest cas es va utilitzar només aigua destil·lada, ja que en el segon disseny s'havia comprovat que en afegir la dissolució de NaOH els resultats eren pitjors. El valor mesurat amb el voltímetre, en aquest últim cas, va ser més satisfactori, ja que es va arribar a mantenir a un nivell d'aproximadament 0,9 V.



Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatge 17: Nou material per al disseny 3



Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatge 18: Detall connexió disseny 3

En la següent taula s'exposa el resum dels resultats obtinguts en els tres dissenys construïts.

RESUM DELS TRES DISSENYS DE PILA D'HIDROGEN CASOLANA			
DISSENY	ELECTRÒLIT	MEDI	VOLTATGE OBTINGUT
1	Espiral de filferro d'acer inox.	Aigua destil·lada	0,12 V
2	Fregall acer inox.	Aigua destil·lada + dissolució NaOH	0,30 V
	Fregall acer inox.	Aigua destil·lada	0,53 V
3	Brides acer inox. certificat	Aigua destil·lada	0,94 V

4.2.4 Comprovacions

En el tercer disseny, que va obtenir els millors resultats, es va fer la següent comprovació per descartar la possibilitat que s'hagués comès algun error de mesura: es van desconnectar els cables del voltímetre de la pila de 9V i es va comprovar que el valor que es mostrava canviava a 0 V directament, sense fer una disminució gradual. L'objectiu era assegurar que el voltatge mesurat corresponia a l'efecte de la pila d'hidrogen i no al voltatge de la pila de 9 V.

4.3. Anàlisi del voltatge generat, variant la temperatura

Per tal de comprovar fins a quin punt la variació de la temperatura de l'aigua destil·lada pot modificar el voltatge que genera la pila d'hidrogen, s'ha dut a terme una anàlisi tenint com a base la modificació d'aquest paràmetre.

Per a realitzar aquest estudi, s'ha efectuat una pràctica en la qual s'ha variat la temperatura de l'aigua amb 10 valors diferents; entre un mínim de 5 °C i un màxim de 90 °C . No s'han usat valors més petits que 0°C ni superiors a 100°C ja que, en els dos casos, es produiria un canvi en l'estat de l'aigua. Per a variar la temperatura de l'aigua, s'han usat glaçons d'aigua destil·lada (per refredar-la) i una placa calefactora (per escalfar-la). A més, per comprovar la temperatura, s'ha emprat un termòmetre digital de rang entre 0 °C i 160 °C.

Per a mesurar els volts generats per la pila d'hidrogen en els 10 valors diferents de temperatura de l'aigua, s'ha usat la pila del kit de fabricació industrial. El procediment ha consistit en:

- escalfar o refredar l'aigua destil·lada i abocar-la en els elèctrodes
- connectar la bateria perquè es realitzi l'electròlisi (esperar uns 15 min)
- connectar el voltímetre en els pols corresponents per obtenir el valor del corrent generat

En la següent taula es mostren els resultats obtinguts:

Variació de voltatge en funció de la temperatura del medi	
TEMPERATURA (°C)	VOLTATGE (V)
5	1,44
15	1,42
25	1,46
35	1,40
45	1,45
55	1,44
65	1,42
75	1,43
85	1,45
95	1,44

Els resultats posen de manifest que la modificació del paràmetre de temperatura no afecta el voltatge produït ja que la diferència entre els valors és molt baixa (de centèsimes) i no segueix una sèrie lògica. Aquesta alteració dels resultats pot ser deguda a altres factors que no estan relacionats amb la temperatura directa del medi: per exemple, la precisió del voltímetre o la interacció de la temperatura

de l'aigua amb la de l'ambient. Així doncs, com que es demostra que la temperatura no afecta el corrent generat, no es pot establir una temperatura òptima d'actuació.



Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatge 19: Materials usats en la pràctica de la temperatura



Fotografies : Mr. Kaydy Cain

Imatges 20 i 21: Procediment de refredament de

(a l'esquerra) i d'escalfament (a la dreta)

l'aigua



Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatge 22: Generació de corrent a través de la placa solar del kit comercial

4.4 Anàlisi del voltatge, modificant el pH

Amb la finalitat de verificar si la modificació del pH de l'aigua, inicialment destil·lada, per tant d'un pH neutre, afecta el voltatge que produeix la cel·la, s'ha fet una anàlisi tenint com a base la modificació d'aquest paràmetre.

Per a modificar el pH s'han emprat diferents dissolucions: per canviar el pH cap a àcid (reacció amb un pH inferior) s'ha usat una dissolució d'àcid sulfúric (H_2SO_4) i una dissolució d'hidròxid de sodi (NaOH) per a canviar-lo cap a base (reacció amb un pH superior). Abans d'usar aquests productes, es va consultar la fitxa de seguretat per tal de manipular-los i fer-ne un bon ús; es van usar guants i ulleres de protecció, ja que els dos productes químics incorporen el pictograma de corrosió.

Per a fer aquesta pràctica, es va descartar usar la pila d'hidrogen del kit, ja que els productes podien malmetre els materials dels elèctrodes i/o la pila PEM. Per tant, en aquest cas, s'ha fet servir la pila casolana. El procediment ha consistit a afegir una dissolució per canviar el pH, i, amb l'ajuda d'uns papers indicadors de pH, prendre'n les diferents mesures. Quan s'ha obtingut el pH desitjat, es connecta la pila de 9V perquè es realitzi l'electròlisi i, un cop desconnectada, es mesura el voltatge generat per la pila d'hidrogen casolana.

Variació de voltatge en funció del pH	
pH	Voltatge generat (V)
1 (àcid)	0,96
3 (àcid)	0,96
4 (àcid)	0,95
6-7 (neutre)	0,94
9 (base)	0,92
12 (base)	0,91
14 (base)	0,90

Els resultats obtinguts han demostrat que el paràmetre del pH sí que afecta el voltatge generat. Tot i que la diferència és de centèsimes, es pot arribar a la conclusió que com més àcida és la dissolució més voltatge es genera. Malgrat això, la millora no és suficientment important i, per contra, si es modifica el pH de l'aigua destil·lada, aquesta deixa de ser pura, de manera que la pila acaba generant més residus, a part d'aigua i calor i, per tant, es produeix certa contaminació, de manera que es contradiu l'objectiu de les piles d'hidrogen com a font d'energia no contaminant.



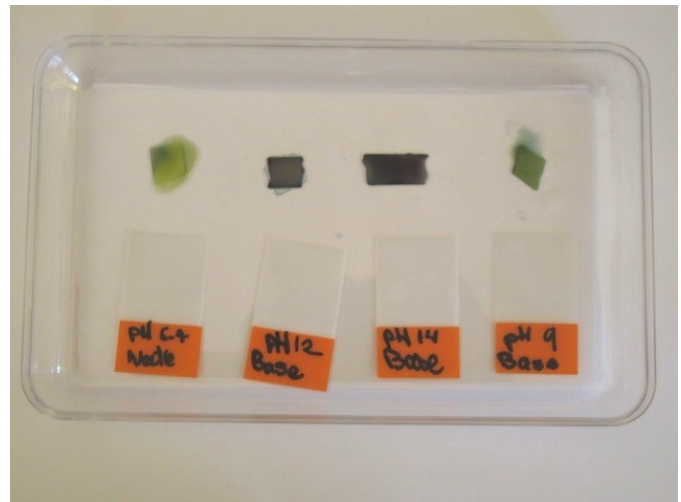
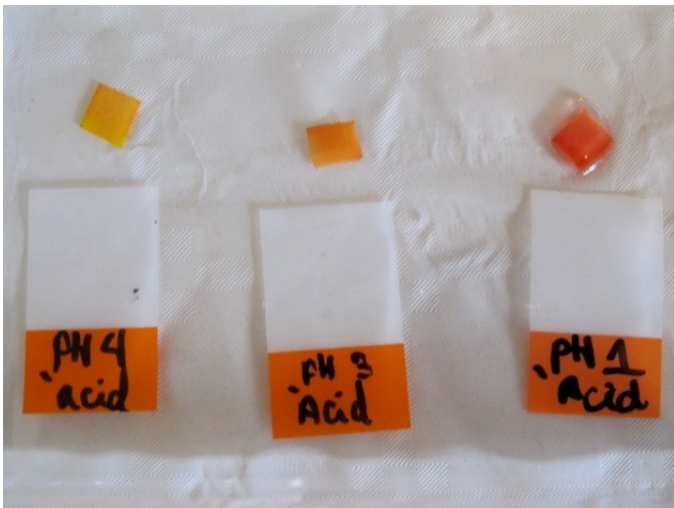
Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatge 23: Materials usats en la pràctica del pH



Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatge 24: Preparació de la dissolució àcida



Imatges 25 i 26: Mostres dels diferents pH amb els papers indicadors

4.5 Comparació entre la pila casolana, la pila del kit i un generador

Amb l'objectiu de determinar quin tipus de generador elèctric és el millor, s'han dut a terme diverses pràctiques i comprovacions per obtenir diferents característiques de cada aparell. S'ha comparat la pila d'hidrogen casolana, la pila de fabricació industrial del kit d'una maqueta de cotxe i, per últim, un generador elèctric. En els tres casos s'ha determinat el voltatge, la intensitat, la potència, el rendiment i els residus generats.

4.5.1 Càlculs de la potència de les piles d'hidrogen

La potència d'una pila d'hidrogen es calcula amb la següent fórmula:

$$(P = V \text{ (voltatge)} \cdot I \text{ (intensitat)})$$

Per tant, per a poder calcular aquesta característica, s'ha de mesurar el voltatge i la intensitat que circulen per la pila. Per mesurar aquests valors s'usa el voltímetre.

Voltatge: per a calcular el voltatge d'un circuit s'usa un voltímetre, que ha d'estar connectat correctament perquè, si no, es podria espatllar. El cable negre ha d'estar connectat a la connexió COM i el vermell a la connexió V; a continuació, s'han de connectar als pols corresponents de la pila. Amb la rodeta es pot ajustar la unitat de la mesura.

Intensitat: per a calcular la intensitat d'un circuit s'usa un amperímetre, que també ha d'estar connectat correctament perquè, si no, no funcionarà i es pot danyar l'aparell. El cable negre ha d'estar connectat a la connexió COM, com en el cas anterior; en canvi, el cable vermell, a la connexió mA; un cop els cables estan correctament connectats a l'amperímetre, s'han de connectar als pols corresponents de la pila.

Rendiment: el rendiment de les piles d'hidrogen es calcula mesurant el voltatge obtingut entre el voltatge que ens dona la taula de potencials estàndards de reducció (1,23V). En el cas de la pila del kit, que consta de dues cel·les, el voltatge obtingut s'ha de dividir entre dos. $\eta = (V. \text{Obtingut} / 1,23) \cdot 100$

Pel que fa a la contaminació, com s'ha esmentat anteriorment, les piles d'hidrogen no contaminen, ja que el producte de les reaccions que es produeixen és aigua i calor.

Reacció pila d'hidrogen: $2H_2O (l) \quad 2H_2 (g) + O_2 (g)$

Per tal d'obtenir uns valors al més exactes possible, s'han pres les mesures tres vegades i se n'ha calculat el valor mitjà.

4.5.2. Càlculs amb la pila d'hidrogen casolana

Potència ($P = V \cdot I$)

Mesures de voltatge i intensitat de la pila d'hidrogen casolana				
	Mesura 1	Mesura 2	Mesura 3	Mitjana
Voltatge (V)	0,82	0,79	0,85	0,82
Intensitat (A)	0,012	0,007	0,014	0,011

Taula completa

Resum de característiques de la pila d'hidrogen casolana					
Nom	Voltatge	Intensitat	Potència	Rendiment	Residus
Pila d'H ₂ casolana	0,82 V	0,011 A	0,009 W	66,67 %	Aigua i calor

4.5.3 Càlculs amb la pila del kit

Potència ($P = V \cdot I$)

Mesures de voltatge i intensitat de la pila d'hidrogen del kit				
	Mesura 1	Mesura 2	Mesura 3	Mitjana
Voltatge (V)	1,44	1,47	1,43	1,45
Intensitat (A)	0,024	0,025	0,022	0,024

Taula completa

Resum de característiques de la pila d'hidrogen del kit					
Nom	Voltatge	Intensitat	Potència	Rendiment	Residus
Kit pila d'hidrogen	1,45 V	0,024 A	0,035 W	58,94 %	Aigua i calor

4.5.4 Càlculs amb el generador

Característiques del generador utilitzat per a la prova:

- Potència màxima: 2800 W
- Voltatge màxim: 230 V
- Corrent determinat: 110 A
- Combustible: Gasolina
- Velocitat : 3000 rpm
- Pes: 39,5 Kg
- Capacitat generador: 18 L



Fotografia: Mr. Kaydy Cain

Imatge 27: Generador usat en la pràctica

Cal tenir en compte que els càlculs en un generador s'han de dur a terme amb certes diferències respecte als càlculs amb la pila casolana i la del kit.

Potència: la potència útil d'un generador ve determinada en funció de l'aparell i del que aquest consumeixi. En aquest cas, es connecta al generador un assecador que consumeix 1700 W i té un rendiment del 67 %.

Voltatge: per a calcular el voltatge produït pel generador, cal observar la pantalla, que inclou un voltímetre.

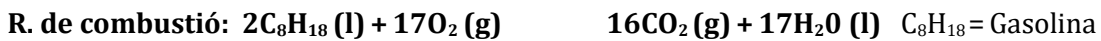
Intensitat: per a calcular la intensitat produïda pel generador, s'usa la següent fórmula ($I = P / (V \cdot \cos\phi)$), ja que aquests funcionen en corrent altern. El $\cos\phi$ de la fórmula fa referència al rendiment de l'aparell connectat, en aquest cas l'assecador (67 %).

Rendiment: el rendiment d'un generador es calcula dividint l'energia útil entre l'energia consumida.

$$\eta = (E_u/E_c) \cdot 100$$

- **Energia consumida ($E_c = P_c \cdot m$):** l'energia consumida es calcula mitjançant el poder calorífic de la gasolina en condicions normals (0 °C i 1 atm.) multiplicat per la massa gastada (amb la densitat i el volum s'aconsegueix aquest valor). El poder calorífic de la gasolina és **43,95 KJ/g** i la densitat de la gasolina és **0,68 g/ml**.
- **Energia útil:** L'energia útil s'obté emprant la següent fórmula: $E = P \cdot t$ (kW · h). Un cop s'obté l'energia en kW · h s'han de canviar les unitats de mesures a Joules. **1 kW · h = 36 · 10⁵ J**

Contaminació: els generadors usen gasolina com a combustible. Per tant, per saber els residus que es generen en la combustió, cal observar la seva reacció de combustió.



Com es pot observar en la reacció, els productes d'aquesta són diòxid de carboni i aigua. El diòxid de carboni és un gas molt contaminant i perillós per al medi ambient.

Per a determinar el que contamina el generador, es mesura quant combustible consumeix (volum) i, amb la densitat de la gasolina (**0,68 g/ml**), s'obté la massa consumida ($m = D \cdot V$); un cop obtinguda la massa, amb la massa molecular i càlculs estequiomètrics s'obté el nombre de mols de CO₂; un cop obtinguts la massa molecular (**144 g/mol**) i la densitat (**0,00196 g/ml = 1,96 g/L**) s'obté el volum de CO₂ generat.

Intensitat ($I = P/(V \cdot \cos\phi)$)

Càlcul de la intensitat del generador			
Voltatge	Potència	Rendiment assecador	Intensitat
227 V	1700 W	67 %	11,17 A

Energia consumida ($E_c = P_c \cdot m$)

Càlcul de l'energia consumida del generador				
Volum mesurat	Densitat	Massa	Poder calorífic	Energia c.
30 ml (aprox.)	0,68 g/ml	20,4 g	43,95 kJ/g	896,58 kJ

Energia útil ($E=P \cdot t$)

Càlcul de l'energia útil del generador			
Potència	Temps	Energia útil	E. útil en Joules
1700 W = 1,7 kW	3 min = 0,05 h	0,085 kW · h	306 kJ

Rendiment ($\rho = (E_u/E_c) \cdot 100$)

Càlcul del rendiment del generador		
Energia útil	Energia consumida	Rendiment
306 kJ	896,58 kJ	34,13 %

Contaminació

Càlcul de la contaminació generada pel generador				
Volum mesurat (gasolina)	Densitat (gasolina)	Massa (gasolina)	M. molecular (gasolina)	N. mols (gasolina)
30 ml (aprox.)	0,68 g/ml	20,4 g	114 g/mol	0,18 mols
N. mols (CO ₂)	M. molecular (CO ₂)	Massa (CO ₂)	Densitat (CO ₂)	Volum mesurat (CO ₂)
1,43 mols	44 g/mol	62,99 g	1,96 g/l	32,14 l

Taula completa

Resum de característiques del generador

Nom	Voltatge	Intensitat	Potència	Rendiment	Residus
Generador	227 V	11,17 A	1700 W	34,13 %	Diòxid de carboni i aigua

4.5.5 Taula comparativa

Un cop obtinguts tots els resultats plantejats en aquesta part pràctica del treball, s'arriba a la conclusió que la pila d'hidrogen és un dispositiu que té un bon rendiment (66,67% en el cas de la pila casolana i 58,94 % en el cas de la pila del kit), més alt del que les expectatives de la pràctica preveien i superior al rendiment del generador, que, en aquest cas, té un valor de rendiment de 34,13%.

Comparativa de característiques pila d'hidrogen casolana - pila d'hidrogen del kit-generador					
Nom	Voltatge	Intensitat	Potència	Rendiment	Residus
Pila d'hidrogen casolana	0,82 V	0,011 A	0,009 W	66,67 %	Aigua i calor
Kit pila d'hidrogen	1,45 V	0,024 A	0,035 W	58,94 %	Aigua i calor
Generador	227 V	11,17 A	1700 W	34,13 %	Diòxid de carboni i aigua

A més, un factor determinant i important en l'actualitat és l'element mediambiental. En aquest apartat, les piles d'hidrogen superen el generador, ja que els generadors generen diòxid de carboni (contaminant) i aigua i, en canvi, les piles d'hidrogen generen aigua i calor, que són residus no contaminants. S'ha calculat que si un generador usa uns 30 ml de gasolina, genera 32,14 l de diòxid de carboni. Això significa que es produeix molt volum de diòxid de carboni pel poc combustible usat.

Tot i així, les cel·les de combustible no superen en tot els generadors. En termes energètics, els generadors obtenen molta més energia i potència amb menys combustible que les piles d'hidrogen (amb 30 ml de gasolina assoleixen els 896,5 kJ).

Un cop tinguts en compte tots aquests valors, cal també considerar el factor econòmic. Mentre que les piles d'hidrogen tenen un elevat preu i són difícils d'aconseguir, un generador té un preu assequible per a quasi tothom.

5. PROJECCIÓ DE FUTUR DE LA PILA DE COMBUSTIBLE

Tot i que el futur de la pila d'hidrogen és incert, amb aquest estudi s'ha pogut comprovar que té molts avantatges, però que actualment és una alternativa que presenta encara problemes per solucionar que en dificulten l'ús. Per començar, el gran inconvenient d'aquestes piles és el preu de fabricació, que és bastant alt perquè els materials són molt costosos i difícils d'aconseguir (el platí, per exemple); un altre problema és que l'hidrogen és un gas molt inflamable i, si es fessin centrals per obtenir-lo, s'haurien de tenir unes grans mesures de seguretat i prevenció. Avui en dia resulta molt més costós fabricar una pila d'hidrogen que un generador o una bateria.

Ara bé, els generadors i bateries són fonts d'energia molt contaminants i actualment el planeta Terra necessita solucions que no posin en perill la seva conservació; en canvi, les piles d'hidrogen només produeixen calor i aigua, que no són contaminants.

Ara per ara, l'ús d'aquestes piles està centrat sobretot en el camp de l'automobilisme; algunes multinacionals hi estan investigant i fabriquen prototips de cotxes que combinen un motor elèctric i les piles d'hidrogen. El gran problema d'aquest tipus de cotxe és, d'una banda, el preu i, de l'altra, que no hi ha gaires estacions de proveïment d'hidrogen, ja que són molt cares. Es calcula que una central costa un milió d'euros i que han de passar entre 10 i 15 anys per amortitzar-la.



Imatge 28: Toyota Mirai 2017 (cotxe híbrid: hidrogen i elèctric)⁸

⁸Imatge extreta de: 2017 Toyota Mirai [en línia]. Motortrend.com.[consulta: juliol de 2018]. Disponible a: <https://www.motortrend.com/cars/toyota/mirai/2017/> <<https://st.motortrend.com/uploads/sites/10/2016/08/2017-Toyota-Mirai-front-three-quarter-in-motion-02.jpg>>

Però hi ha altres camps que també s'estan beneficiant de les piles de combustible. Com explica P.L. Cabot en un article de l'any 2002⁹:

Als anys 1980 es pot dir que pràcticament només els centres universitaris estudiaven les piles de combustible. Posteriorment, cada cop han estat i són més les companyies que s'hi dediquen amb el repte de millorar i optimitzar els catalitzadors, les membranes, les connexions elèctriques, el tractament dels combustibles i altres gasos, etc., per tal de reduir-ne el cost. Hom pot dir que les piles de combustible faran una contribució valuosa a la generació d'energia de forma ecològicament acceptable. (...) Per a les aplicacions portàtils, com per exemple telèfons mòbils (podrem parlar pel telèfon mòbil durant un mes sense recàrrega), càmeres de vídeo, alarmes antirobatori, etc., hom pot comptar amb petites piles de combustible dels tipus PEMFC i DMFC. Les primeres funcionen amb l'H₂ pur que es pot aconseguir de l'hidrogen emmagatzemat en hidrurs metàl·lics o d'altra forma, mentre que les últimes, més desenvolupades, són operatives afegint una mica de metanol al dipòsit de la pila. Tot això s'estendrà aviat.

La projecció de futur de la pila d'hidrogen és indiscutible, tal com explica Claudi Mans en parlar del que avui en dia ja es coneix com l'economia de l'hidrogen:

És un model energètic mundial pel qual l'hidrogen passaria a ser el component principal de tot el sistema i totes les fonts energètiques diverses passarien a transformar-se en hidrogen (...) el concepte economia mundial de l'hidrogen es va definir el 1970 i es basa en l'aspecte energètic com a combustible substitutiu dels derivats del petroli¹⁰.

Jeremy Rifkin és un sociòleg, economista i activista nord-americà conegut com un dels màxims referents a l'hora de difondre "l'economia de l'hidrogen" com a l'alternativa necessària a molts dels problemes de la humanitat actual. En la sinopsi d'un dels seus llibres queda ben resumida la projecció de futur de l'hidrogen com a font d'energia:

El hidrógeno es el elemento más básico y ubicuo del universo, la materia de la que están hechos el sol y las estrellas. En este inicio del siglo XXI, los principales fabricantes de automóviles han destinado más de 2.000 millones de dólares a desarrollar prototipos alimentados con hidrógeno, y se espera que en pocos años circulen ya los primeros vehículos producidos en serie. Además, cuando millones de usuarios puedan conectarse a redes energéticas de hidrógeno de alcance local, regional y nacional, basadas en los mismos principios que hicieron posible la World Wide Web, podrán compartir la energía de igual a igual y crear un modelo descentralizado. El hidrógeno puede paliar la dependencia del mundo respecto

9 CABOT, P.L. "Les piles de combustible com a sistemes electroquímics per a les alternatives energètiques". [pdf en línia]. Publicacions IEC. *Revista de la Societat Catalana de Química*, 3/2002. P. 49-61 [consulta: juliol de 2018]. Disponible a: <https://publicacions.iec.cat/repository/pdf/00000020/00000041.pdf>

10 MANS, C. *100 preguntes de química quotidiana*. p.186

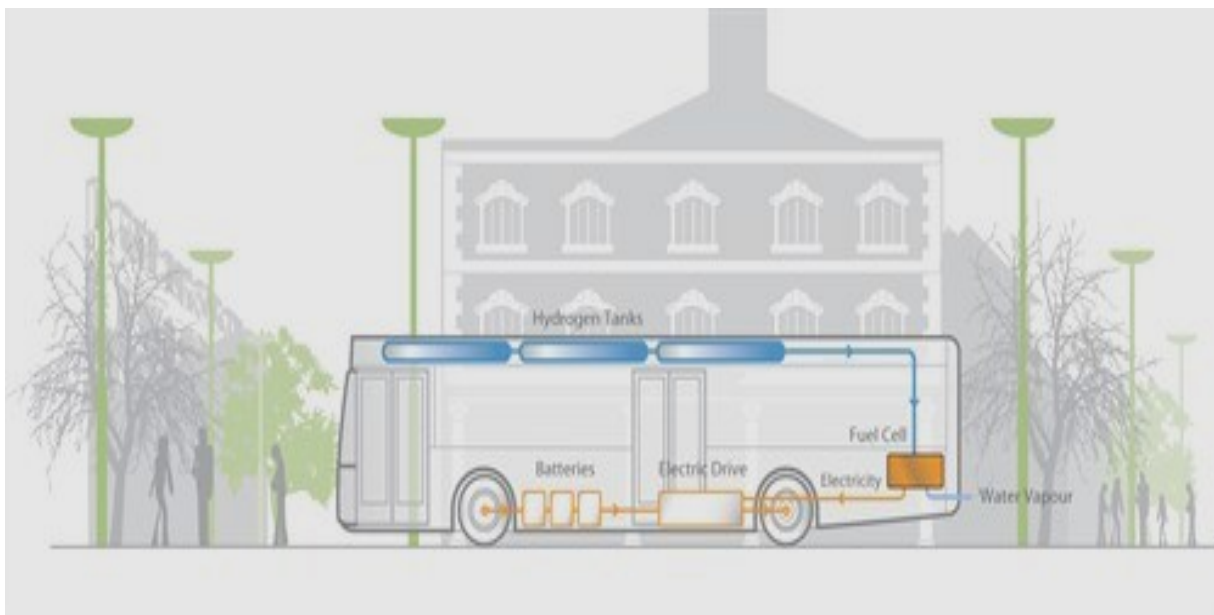
a las importaciones de petróleo, y contribuir a enfriar el peligroso juego geopolítico que se genera entre algunos países productores y el mundo occidental¹¹.

Tot i que la implantació de l'hidrogen com a font bàsica d'energia encara no és un fet, són diverses les indústries que hi estan treballant des de fa un temps. La *Fuell Cell Today*, amb seu a Londres, és la principal organització que s'ocupa de difondre i proporcionar informació fiable a les empreses que se centren en les solucions basades en les piles de combustible. A la seva pàgina web¹², estableixen les tres principals aplicacions de les piles de combustible en l'actualitat:

- la generació d'energia per al transport
- la generació d'energia portàtil
- la generació d'energia estacionària

També inclouen una categoria de combustible i infraestructura, relacionada amb la producció, distribució, emmagatzematge i distribució de combustibles per a piles de combustible, ja que és fonamental per a la implantació de la tecnologia d'aquest tipus de piles.

Aquestes aplicacions queden ben representades en les següents il·lustracions (extretes de la mateixa web), que ens mostren com pot ser el nostre futur proper.



Imatge 29: Aplicació de la pila de combustible en la generació d'energia per al transport¹³

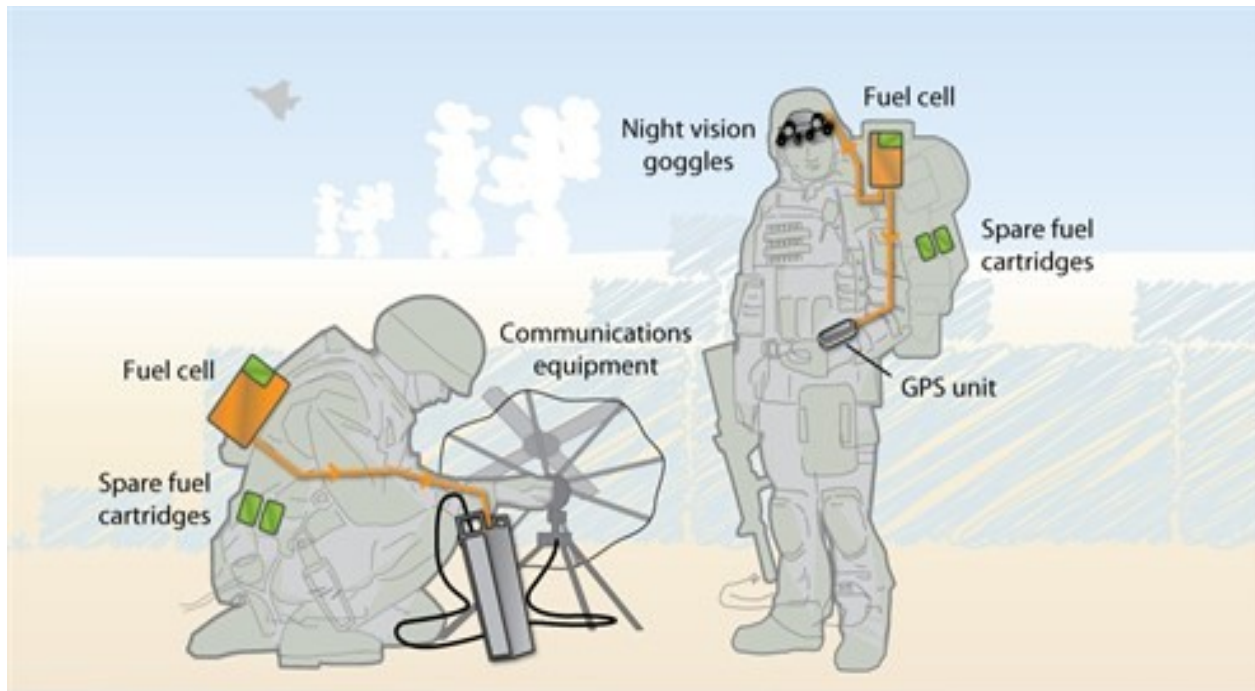
¹¹RIFKIN, J. *La economía del hidrógeno. Cuando se acabe el petróleo*. Sinopsis consultada a:

<https://www.planetadelibros.com/libro-la-economia-del-hidrogeno/21816>

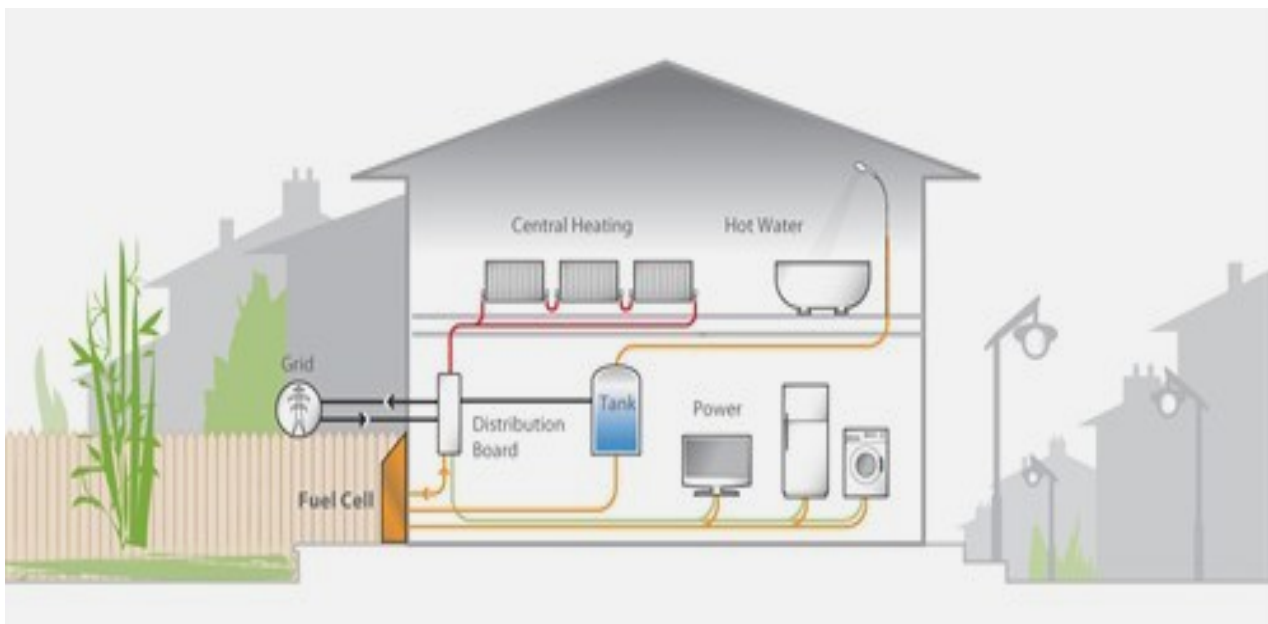
¹²<http://www.fuelcelltoday.com>

¹³Imatge extreta de: *Transport* [en línia]. fuelcelltoday.com. grup Johnson Matthey plc.

[consulta: octubre de 2018]. Disponible a: < <http://www.fuelcelltoday.com/applications/transport>>



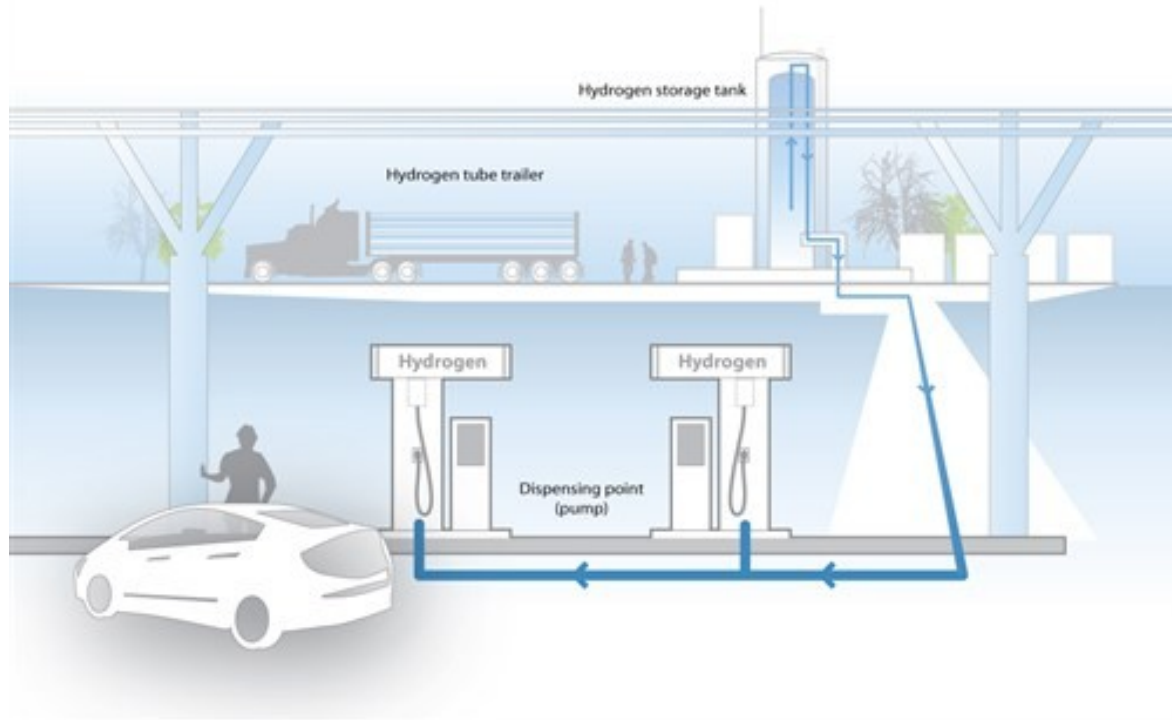
Imatge 30: Aplicació de la pila de combustible en la generació d'energia portàtil¹⁴



Imatge 31: Aplicació de la pila de combustible en la generació d'energia estacionària (per unitats de subministrament elèctrica i/o tèrmica no dissenyades per moure's)¹⁵

¹⁴ Imatge extreta de: *Portable* [en línia]. fuelcelltoday.com. grup Johnson Matthey plc. [consulta: octubre de 2018]. Disponible a: < <http://www.fuelcelltoday.com/applications/portable> >

¹⁵ Imatge extreta de: *Portable* [en línia]. fuelcelltoday.com. grup Johnson Matthey plc. [consulta: octubre de 2018]. Disponible a: < <http://www.fuelcelltoday.com/applications/portable> >



Imatge 32: Producció, distribució i emmagatzematge de combustibles per a piles de combustible¹⁶

¹⁶ Imatge extreta de: *Fuel and infrastructure* [en línia]. fuelcelltoday.com. grup Johnson Matthey plc. [consulta: octubre de 2018]. Disponible a: < <http://www.fuelcelltoday.com/applications/fuel-and-infrastructure> >

6. CONCLUSIONS

Encara falta molt per estudiar, innovar i descobrir sobre les piles d'hidrogen; ara per ara, no són una opció viable, ja que tenen un elevat cost i no surt a compte usar-les, però, si se solucionen aquests problemes i es troben materials més econòmics i que rendeixin millor, seran l'alternativa perfecta.

Es tracta d'una font d'energia renovable que es podria combinar amb l'energia solar perquè es produís l'electròlisi, i es generaria energia 100 % neta, fent que la contaminació es reduís notablement i el nostre medi ambient millorés.

Malgrat això, crec que les piles d'hidrogen tardaran bastants anys a arribar a tots els dispositius i que es deixi d'emprar el petroli. Per a mi és un canvi necessari ja que, si no trobem l'alternativa als combustibles fòssils, el nostre món està en perill. Actualment, les piles d'hidrogen no són assequibles i els generadors/bateries, encara que contaminen, segueixen sortint més a compte en termes de rendibilitat, però no de rendiment.

Realitzar aquest treball m'ha servit per a completar una sèrie d'objectius que m'havia proposat abans de començar-lo. He après com són aquestes piles i com funcionen, els diferents tipus que existeixen i en què es diferencien unes de les altres; he identificat els beneficis i problemes d'aquests dispositius i això m'ha permès treure una conclusió objectiva sobre el tema. En la part pràctica he estat capaç de construir-ne una amb materials que tenia per casa, i experimentant amb ella i la pila de fabricació industrial del kit, he pogut reconèixer de manera directa les característiques d'aquestes piles.

Finalment, amb els resultats obtinguts queda clar que les piles d'hidrogen seran una de les alternatives a les fonts d'energia actuals en uns anys, ja que es pot obtenir energia 100 % neta, és a dir, sense generar residus que contaminin. Pel que fa al meu últim objectiu, he intentat fer una predicció de com pot evolucionar en les nostres vides la implantació d'aquesta font. Tot i que el futur és incert, jo crec que aquestes piles de combustible acabaran formant part del nostre dia a dia. De moment, l'àmbit en el qual s'està desenvolupant amb més interès és el de l'automoció, tal com que es pot comprovar en el projecte *European Integrated Hydrogen Project*¹⁷ que té per objectiu regular l'aplicació d'aquesta tecnologia en els cotxes. Però, com he exposat en l'apartat *Projecció de futur*, ja s'estan obrint moltes més vies d'aplicació.

¹⁷<http://www.eihp.org/>

7. FONTS D'INFORMACIÓ, BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA

BELTRÁN, A. *Química. (Volum 1)* Editorial Reverté S.A., 1990

CABOT, P.L. "Les piles de combustible com a sistemes electroquímics per a les alternatives energètiques". [pdf en línia]. *Revista de la Societat Catalana de Química*, 3/2002. P. 49-61 [consulta: juliol de 2018]. Disponible a: <https://publicacions.iec.cat/repository/pdf/00000020/00000041.pdf>

GRAY, T *Los elementos*. Editorial VOX, 2013

MANS, C *100 preguntes de química quotidiana*. Edicions Cossetània, 2017

REYES, L. *La pila de combustible de hidrógeno está de moda pero, ¿sabes cómo funciona? (2014)*, [en línia] Automoción.com [consulta: maig 2018] Disponible a: <<https://www.autonocion.com/la-pila-de-combustible-de-hidrogeno-esta-de-moda-pero-sabes-como-funciona/>>.

RIFKIN, J. *La economía del hidrógeno. Cuando se acabe el petróleo*. Editorial Booket, Colección Bolsillo Paidós, 2002

RODRIGUEZ, M *¿Qué son las pilas de combustible?* [en línia] Revista digital INESEM [consulta: abril 2018] Disponible a: <<https://revistadigital.inesem.es/gestion-integrada/pilas-combustible/>>.

Build a hydrogen fuel cell [en línia] Extret de: Chapter 3 : Electrochemistry, Scitoys.com [consulta: maig 2018] Disponible a : <http://scitoys.com/scitoys/scitoys/echem/fuel_cell/fuel_cell.html>.

Corrosión en pilas de combustible [en línia]. Ingeniería de superficies y materiales nanoestructurado. Facultat de Químicas, Universidad Complutense de Madrid [consulta: maig de 2018]. Disponible a: <http://webs.ucm.es/info/tuma/quimicas_superficie/img/pilas/imagen0.gif>

European Integrated Hydrogen Project. <http://www.eihp.org/>

Fuelcelltoday.com. [en línia] Grup Johnson Matthey plc. [consulta: octubre de 2018]. Disponible a: <<http://www.fuelcelltoday.com/applications>>

Hidrógeno [en línia] .Wikipedia, La Enciclopedia Libre. [consulta: maig 2018] Disponible a:< <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Hidr%C3%B3geno&oldid=111136900>>.

Pila de combustible [en línia]. Wikipedia, La enciclopedia libre. [consulta: març 2017] Disponible a: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Pila_de_combustible&oldid=111114113.

Pilas de combustible [en línia] Ariema energía y medioambiente S.L. [consulta: abril 2018] Disponible a: <<http://www.pilasde.com/tecnologia-del-hidrogeno/pilas-de-combustible>>.