

L'HIDROGEN: RECURS DEL PRESENT



OPORTUNITAT DEL FUTUR

Lestonnac "L'Ensenyança" Lleida

Curs 2012-2013

*Vull agrair a totes aquelles persones que han fet aquest treball possible. A la meva tutora per la seva gran ajuda en moments d'incertesa i a la meva família per estar sempre allí quan la necessitava, sobretot a la meva mare pel seu recolzament incondicional en tot moment. **Moltes gràcies.***

“¿Qué es lo que van a quemar en lugar de carbón? Agua, respondió Pencroft. El agua, descompuesta en sus elementos por la electricidad. Sí, amigos míos, creo que algún día se empleará el agua como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno de los que está formada, usados por separado o de forma conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor. **El agua será el carbón del futuro.**”

“La isla misteriosa” (1874)

Julio Verne

Índex

1. Introducció.....	6
---------------------	---

FONAMENTS TEÒRICS. L'àtom d'hidrogen

2. L'Hidrogen, un àtom singular	8
2.1. Història del descobriment	8
2.2. L'àtom d'hidrogen: característiques.....	8
2.3. L'àtom d'hidrogen: estructura.....	9
2.4. Isòtops	10
2.5. Abundància de l'hidrogen.....	14
3. Estats naturals de l'hidrogen	16
3.1. Dihidrogen	16
3.1.1 Estructura i propietats moleculars	17
3.1.2 Síntesi al laboratori.....	17
4. Compostos de l'hidrogen.....	18
4.1. Hidrurs	18
4.1.1 Hidrurs i l'enllaç iònic	18
4.1.2 No metalls i l'enllaç covalent.....	19
4.1.3 Hidrurs metàl·lics.....	20
4.2. Estabilitat dels hidrurs	21
4.3. Química orgànica i l'hidrogen.....	21

MARC PRÀCTIC. APLICACIONS DE L'HIDROGEN

5. Aplicacions energètiques.....	24
5.1. Combustibles no fòssils	24
5.1.1 Pila de combustible	24
5.1.2 Obtenció del hidrogen.....	28
5.1.3 Aplicacions de la pila de combustible.....	31
5.2. Combustibles fòssils	34
5.2.1 Hidrocracking	34
6. Aplicacions industrials	36
6.1. Síntesi industrial de l'amoníac.....	36
6.1.1 Amoníac al laboratori	36
6.1.2 Procés Haber-Bosch.....	39
6.2. Importància de la producció d'amoníac	44

6.2.1	Producció d'àcid nítric	44
6.2.2	Fertilitzants i agricultura	48
6.2.3	Altres usos de l'amoníac	50
6.3.	Producció d'àcid clorhídric	51
6.3.1	Estructura i característiques	51
6.3.2	Síntesi d'àcid clorhídric.....	51
6.3.3	Aplicacions de l'àcid clorhídric.....	52
7.	Emmagatzematge i transport d'hidrogen.....	54
7.1.	Emmagatzematge	54
7.1.1	Hidrogen comprimit.....	56
7.1.2	Hidrogen líquid	56
7.1.3	Hidrogen metàl·lic	57
7.2.	Transport d'hidrogen.....	57
7.2.1	Hidrogen i seguretat	58
8.	Hidrogen, una oportunitat de futur sostenible	61
8.1.	Economia del hidrogen.....	61
8.1.1	Crítiques a l'economia del hidrogen	61
8.1.2	Implementació de l'economia del hidrogen	64
9.	Conclusions	66
10.	Fonts consultades	68

1. Introducció i Objectius

La química sempre m'ha semblat una assignatura molt interessant a la que se li pot treure molt profit. Des que vaig començar a cursar-la a l'educació secundària, hi va haver un element que hem va causar cert interès, ja que hem va sobtar que no formés part de cap grup de la taula periòdica o fins i tot algun dels compostos tan especials que formava. A més, vaig sentir parlar puntualment de processos que involucraven aquest element tan singular, i algun dels seus avantatges en certs aspectes de la vida diària de les persones. Aquest element era l'hidrogen. El fet que l'àtom més senzill de tots, pogués tenir unes propietats tan importants i útils hem va sorprendre molt.

Així que vaig començar a investigar pel meu compte, i vaig descobrir que l'hidrogen podia ser un candidat ideal per substituir els combustibles fòssils. En un món tan contaminat i tan limitat per aquest tipus de combustible, em va semblar que era un tema digne de ser estudiat més a fons. Per tant, quan vaig tenir l'oportunitat de fer un treball de recerca sobre l'hidrogen i les seves aplicacions en el món modern, em va semblar el moment perfecte per poder aprofundir en aquest tema. Per tant la motivació general d'aquest treball ha estat aprendre i descobrir més sobre aquest àtom tan singular.

Per realitzar aquest treball m'he basat exclusivament en investigació bibliogràfica de fonts escrites i virtuals, per tal de cercar tota la informació sobre la base teòrica de l'hidrogen i tots els estudis formulats sobre aquest. La principal dificultat d'aquestes fonts escrites és la seva limitació en alguns aspectes o la seva complexitat, ja que no tot el que està comprès en el treball forma part del temari de batxillerat.

L'he estructurat en dos blocs ben diferenciats. El primer inclou els fonaments teòrics que comprenen tots els aspectes analítics de l'hidrogen, des de la seva estructura molecular, fins als seus diversos compostos. Aquest bloc està basat purament en teories i postulats científics que ens indiquen com hem de tractar els àtoms i molècules per donar explicació als fenòmens de la matèria.

El segon bloc està compost per un estudi pràctic sobre les aplicacions que té l'hidrogen avui en dia. A més d'explicar el funcionament dels seus processos o aplicacions, també analitza si aquestos són realment viables actualment o poden millorar com a tals. La part final del bloc pràctic, tracta de l'aplicació de l'hidrogen en el futur i com ens pot ajudar a aconseguir un món més sostenible, donant així un missatge esperançador. Per això vaig decidir posar-li el títol de: Hidrogen recurs del present, oportunitat del futur. Ja que així englobaria els dos blocs treballats en el treball.

Els objectius d'aquest treball es basen en respondre dues preguntes inicials que m'han motivat a començar la investigació.

- L'hidrogen, actualment, té alguna aplicació útil per a les persones?
- Un món sense combustibles fòssils és possible? Aleshores, l'hidrogen podria ser un substitut factible d'aquestos?.

FONAMENTS TEÒRICS. L'àtom d'hidrogen.

2. L'hidrogen, un àtom singular

Si busquem en la taula periòdica l'element més especial de tots, no ens caldrà buscar massa, ja que és el primer de tots: l'hidrogen. Encara que es troba en el grup dels alcalins no es pas un metall, ni tampoc és un no-metall, ni tan sols un gas noble; l'hidrogen no pertany a cap grup en particular de la taula periòdica. Aquesta condició li atorga unes condicions físiques i químiques especials. Des dels seus tres isòtops singulars, fins a la seva estructura diatòmica, l'hidrogen té un paper fonamental en l'univers i en la terra.

2.1. Història del descobriment.

La història de l'hidrogen va començar ja fa molts segles i està carregada de singularitats i confusions empíriques.

La primera referència escrita que trobem sobre l'hidrogen és de l'alquimista Von Hohenheim, conegut popularment com Paracels (s.XV). Va observar que al fer reaccionar un àcid fort amb un metall es desprenia una espècie de "aire" que era molt inflamable. Hem de dir que Paracels no va ser conscient, en aquell moment, de que havia descobert un nou element químic.

Més tard Robert Boyle (s XVII) va descriure en el seu llibre "*New experiments touching the relation betwixt flame and air*", una reacció el ferro i un àcid diluït, que donava el que segons ell va definir com *inflammable solution of Mars* (nom alquímic referit al ferro).

Hauria de passar un segle fins que Henry Cavendish (s. XVIII) va reconèixer l'hidrogen com un gas que es produïa en una reacció àcid-metall, també el va descriure com "aire inflamable" i va observar que la seva combustió produïa aigua. També va aconseguir aïllar-lo experimentant amb àcids i mercuri, i va suposar, erròniament, que aquest gas provenia del metall i no de l'àcid. Encara que va cometre aquest error, es considera a Cavendish el descobridor original de l'hidrogen.

Finalment, va ser Lavoisier (s. XVIII) qui va donar-li el seu nom a partir de les paraules franceses: "Hydro", que significa aigua i "Gene" que significa generador. Així que l'hidrogen va ser anomenat el "generador d'aigua" per Lavoisier, qui va descriure així una de les seves reaccions més característiques, la combustió amb oxigen per obtenir aigua.

Com a dada curiosa, va ser Dalton qui va utilitzar per primera vegada la lletra **H** per simbolitzar l'hidrogen en el seu llibre *New System of Chemical Philosophy* (1808).

2.2. L'àtom d'hidrogen : característiques.

L'àtom d'hidrogen es representa amb el símbol **H**, encara que els seus isòtops tinguin nomenclatures diferents, aquest és el seu símbol general. Encara que hem dit que no pertany a cap grup en especial, l'hidrogen té només un electró a l'última capa de valència i es pot cedir o guanyar, donant-li les valències de +1 i -1. Això provoca que pugui comportar-se com un metall o com un no metall que com explicarem més endavant, formarà un tipus de compost o un altre. Pertany al grup 1 i al primer període de la taula periòdica, formant part del grup s, donant al hidrogen una configuració electrònica de $1s^1$. De manera natural és un gas diatòmic, com veurem més tard. Ara que ja hem vist les característiques generals, en les taules següents veurem les propietats atòmiques i les propietats físiques.

Propietats Atòmiques	
Radi mitjà	25 pm
<i>Electronegativitat</i>	2,2 (Pauling)
<i>Radi atòmic</i>	53 pm (Radi de Bohr)
<i>Radi covalent</i>	37 pm
<i>Radi de van der Waals</i>	120 pm
<i>Primera Energia d'ionització</i>	1312 kJ/mol

Propietats Físiques	
<i>Estat ordinari</i>	Gas
<i>Densitat</i>	0,089 9 kg/m ³
<i>Punt de fusió</i>	14,025 K (-259 °C)
<i>Punt d'ebullició</i>	20,268 K (-253 °C)
<i>Punt d'inflamabilitat</i>	255 K (-18 °C)
<i>Entalpia de vaporització</i>	0,44936 kJ/mol
<i>Entalpia de fusió</i>	0,05868 kJ/mol
<i>Volum molar</i>	22,42·10 ⁻³ m ³ /mol

2.3. L'àtom d'hidrogen : estructura.

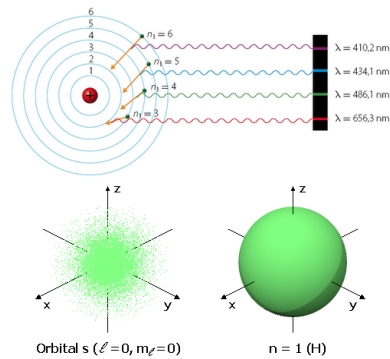
L'àtom d'hidrogen és l'àtom més senzill que existeix. Format per una càrrega positiva o protó en el nucli i una càrrega negativa o electró "orbitant" al seu voltant; és també anomenat àtom monoelèctric. Encara que sol contingui un protó en el nucli, com veurem després l'hidrogen té dos isòtops més que són estables (Deuteri i Triti) i encara que la massa del nucli tan sols augmenti en el nombre de càrregues neutres (neutrons) es pot arribar a duplicar o triplicar la massa de l'hidrogen. L'hidrogen, gràcies a que és molt senzill, pot donar, com veurem ara, una solució exacta als postulats de Bohr i de la mateixa manera es pot explicar a través de la teoria mecanico-quàntica.

Bohr vs. Teoria actual

Com hem dit ja, els nivells energètics de l'hidrogen es poden calcular amb bastant precisió a través del model atòmic de Bohr, que considera que l'electró orbita al voltant del protó de forma anàloga de com ho fa la terra al voltant del Sol. És a dir, que la força electromagnètica fa que un protó i un electró s'atreguin de la mateixa manera que els cossos celestes ho fan a través de les forces gravitatòries. Degut al caràcter quantificable del moment angular postulat pels inicis de la Mecànica Quàntica per Bohr l'electró del model de Bohr tan sols pot orbitar a certes distàncies permeses del nucli, i per tant, tan sols a certs valors d'energia. Encara que el model de Bohr explica amb molta exactitud l'àtom d'hidrogen, una descripció purament mecànic-quàntica ens ofereix uns resultats molt més precisos. Aquesta descripció s'aconsegueix mitjançant l'equació d'Schrödinger per a calcular la densitat de probabilitat de l'electró, que és simplement la probabilitat de trobar una partícula quàntica en un moment puntual i en un espai puntual; aquesta probabilitat és anomenada orbital. A més el tractament de l'electró a través de la teoria ona-partícula de Broglie produeix uns resultats químics, tals com la configuració electrònica, més naturals que amb els postulats de Bohr. Encara que ambdós teories donen l'energia i resultats espectrals totalment idèntics. En la figura 1.1

podem veure la diferència entre els nivells electrònics dels postulats de Bohr i els orbitals de la teoria mecànico-quàntica a través de dos dibuixos.

Una última dada: en el seu estat electrònic fonamental, l'energia del nivell electrònic es de 13,6 eV que equival a un foto ultraviolada de 92 nm de longitud d'ona.



2.4. Isòtops

Una de les característiques més significatives de l'àtom d'hidrogen són els seus isòtops, que tenen gran importància en el món de la química. Aquests isòtops encara que tan sols es diferencien en un o dos neutrons en el nucli les característiques entre ells són ben distants. Això es dona pel fet que les seves masses relatives són molt diferents i aquest afecta a les seves propietats físiques i també, però no de manera tan important, a les seves característiques químiques. Per exemple quan la massa molar dels isòtops augmenta, el seu punt d'ebullició augmenta considerablement, així com la seva energia d'enllaç. Aquestes diferències, com he dit abans, poden ser de gran utilitat pel camp de la química.

L'hidrogen com a àtom, té tres isòtops: el proti, el deuteri i el triti. El proti, també conegut com hidrogen comú, no té cap neutró al seu nucli i té una presència a l'univers d'un **99,985 %**. El deuteri que posseeix un neutró al seu nucli té una abundància del **0,015 %**. Finalment el triti, que és radioactiu, té dos neutrons al seu nucli i la seva abundància es d'un **$10^{-15} \%$** .

Aquets isòtops són tan especials que tenen la seva pròpia nomenclatura. El proti es pot escriure com una H, una D per al deuteri i per al triti una T. Encara que també es poden anomenar com un isòtop qualsevol: ${}^n\text{H}$ on n representa la massa atòmica. De tots els isòtops el triti és l'últim d'estable. Això vol dir que tots els isòtops que tenen una massa molar més gran que el triti són altament inestables i tan sols han estat sintetitzats al laboratori. A més, tenen una vida mitjana tant curta que no arriba al Zeptosegon (10^{-21} segons). Tampoc tenen un nom característic i comprenen des de el ${}^4\text{H}$ fins al ${}^7\text{H}$.

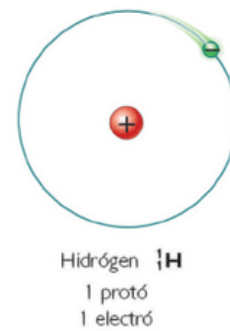
Encara que també descriurem alguna de les seves característiques, sol ens centrarem en els isòtops més estables.

2.4.1. El Proti

El Proti o Hidrogen comú és l'àtom més senzill d'hidrogen que existeix. Està format per una sola càrrega positiva (protó), i una càrrega negativa, (electró) com es representa mitjançant el model de Bohr en la *figura 1.2*. La seva massa mitjana és de $1,0078 u$. És un isòtop estable de

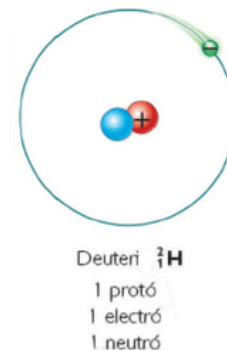
l'hidrogen i com hem mencionat abans es simbolitza amb la ${}^1\text{H}$ o simplement amb **H**. És l'isòtop més abundant de tots amb una presència del **99.985%**, per tant és el més utilitzat en tots els processos que requereixen hidrogen.

És un isòtop molt important, ja que és el que intervé en el procés de fusió de les estrelles, on dos àtoms de proti s'uneixen en una reacció nuclear per donar lloc a un àtom d'heli. A part de la seva funció com a combustible de les estrelles, l'hidrogen o proti té molta importància en la teoria de Bohr o en la teoria mecanico quàntica dels àtoms, ja que per part del model de Bohr, i com hem comentat abans, donava explicacions a tots els seus postulats. I una de les característiques més importants de l'hidrogen, és que pot donar una solució completament analítica a l'equació d'Schrödinger, cosa que amb altres àtoms no es podria aconseguir en la seva totalitat; donant només solucions simplificades.



2.4.2. El Deuteri

En termes d'abundància a l'univers el que ve després del proti és el deuteri. Aquest està compost per una càrrega positiva, o sigui un protó; una càrrega negativa o electró i una càrrega neutra o neutró en el seu nucli. Es representa segons el model de Bohr com en la *figura 1.3*. Aquest neutró de més en el seu nucli provoca que la seva massa mitjana sigui de 2,0141 *u*. Això comporta una duplicació de la massa del proti, cosa que fa que les seves propietats siguin ben diferents. També es un isòtop estable de l'hidrogen, es simbolitza amb la ${}^2\text{H}$ o simplement amb una **D**. Aquets es troba en molta menys quantitat que el proti, ja que la presència en l'univers del deuteri és del 0,15%. Encara que no abundi tant com el proti, les característiques del deuteri, com per exemple l'energia d'enllaç, fa que sigui un isòtop molt interessant.



Un dels compostos més importants que crea el deuteri és l'aigua pesada o aigua deuterada. Aquest tipus d'aigua, té unes característiques diferents de l'aigua comú, que està formada per proti o hidrogen comú. Aquesta aigua no és tant abundant com l'aigua normal, fet que és condicionat per la presència de deuteri en la natura, ja que si féssim un símil: cada 100.000 litres d'aigua normal equivaldrien a 1 litre d'aigua pesada. En la següent taula podem veure les seves diferències més significatives:

Propietat	Aigua pesada D ₂ O	Aigua comú H ₂ O
Punt de fusió (°C)	3,82	0,0
Punt d'ebullició (°C)	101,4	100,0
Densitat (a 20 ° g/ml)	1,1056	0,9982
Entalpia de fusió (cal/mol)	1,515	1,436
Entalpia de vaporització (cal/mol)	10,864	10,515
PH (a 25°C)	7,41	7,0

Com podem veure hi ha diferències entre els dos tipus d'aigües, encara que no siguin molt significatives, tenen efectes posteriors que són molt importants. Aquestes diferències són

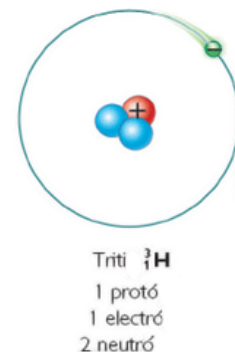
degudes a que, tant els enllaços O-H intramoleculars com els enllaços O...H intermoleculars són més forts en l'aigua deuterada que en l'aigua no deuterada, cosa que afecta a la termodinàmica en els processos en els que es formen o es trenquen aquests enllaços. Així que, com podem veure a la taula, l'aigua pesada és menys volàtil que la normal, cosa que pot ser de gran utilitat. A més, a temperatura estàndard, el PH de l'aigua deuterada és una mica més basic que l'aigua normal, com és pot veure en la taula també.

Aquesta configuració tan especial dóna a l'aigua deuterada una funció molt important com a moderadora i refrigerant de les reaccions de fissió nuclear que utilitzen urani natural com a combustible. La seva funció com a moderador és disminuir l'energia dels neutrons alliberats en la reacció de fissió dels nuclis d'urani i d'aquesta manera aconseguir que els neutrons tinguin la velocitat adequada per al xoc efectiu contra altres nuclis i així continuar la reacció en cadena controlada. Per una altra part, la seva funció com a refrigerador consisteix en evacuar part del calor generat durant el procés de fissió evitant així, que s'arribin a temperatures massa elevades que podrien danyar el reactor. Això s'aconsegueix gràcies a que la temperatura de vaporització és més elevada que l'aigua normal, poden així absorbir molta més calor abans de canviar el seu estat a gasós i alimentar les turbines, per tal de produir energia.

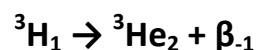
L'aigua pesada es sol obtenir a partir de la destil·lació d'aigua normal, que es basa en concentrar l'aigua pesada a partir d'aigua normal enriquida amb altres elements. O també es pot obtenir a partir d'una electròlisi, un procés més complicat i amb alts costos de producció. Aquest procés es basa en el difícil trencament dels enllaços de l'aigua pesada, respecte als enllaços de l'aigua normal podent així fer una divisió diferenciada de les dues aigües. Però com hem dit no és un procés molt rendible encara que es fes servir en la primera planta de producció d'aigua pesada a Noruega. Com a dada curiosa la major planta de producció i exportació d'aigua deuterada es troba a Argentina, produint 200 t/any.

2.4.3. El Triti

Finalment, ens trobem al triti com a últim isòtop més o menys estable de l'hidrogen. Aquest posseeix una càrrega positiva o protó; una càrrega negativa, l'electró i dues càrregues neutres al nucli, o sigui dos neutrons. Es representa segons Bohr com en *la figura 1.4*. Aquest increment de neutrons fa que la seva massa sigui de 3,0160 u, triplicant així la massa del protí, causant així que no sigui del tot estable. El triti s'anomena ${}^3\text{H}$ o simplement amb una **T**. Té una abundància en la natura de $10^{-15}\%$. El triti és l'únic isòtop radioactiu estable de l'hidrogen amb una vida mitjana de 12,3 anys. Amb un període de vida tan curt, seria d'esperar que tot el triti de l'univers ja s'hagués desintegrat per complet i no existís en la natura. Però el triti es forma constantment degut a l'acció dels raigs còsmics sobre l'atmosfera.



Aquest isòtop no és, com hem dit abans, estable. Per tant el triti pateix una desintegració radioactiva, o simplement que el triti és radioactiu. Precisament aquest isòtop es descompon mitjançant una desintegració beta del seu nucli. Però primer de tot, fixem-nos en la seva reacció general:



Com podem veure en la reacció, l'àtom de triti es converteix en un element més estable com és l'Heli-3. Això es produeix perquè la desintegració beta, consisteix en que un dels neutrons es transforma en una càrrega positiva, transformant així l'isòtop inestable (Hidrogen-3) en un de més estable (Heli-3). La massa es conserva, però també ho han de fer les càrregues, per tant l'àtom allibera una càrrega negativa o electró o partícula beta, per tal d'igualar les càrregues. I com podem veure en la reacció tant masses com càrregues són iguals als dos costats.

El triti té principalment, tres usos: com a rastrejador, per a la fabricació de bombes d'hidrogen i la més curiosa, com a font d'il·luminació. La seva funció com a rastrejador és molt simple: quan el triti es desintegra, i com hem dit abans, allibera una sèrie d'electrons que poden ser rastrejats fàcilment a través d'un controlador, sense pràcticament causar cap dany als teixits humans. El triti també és consumit per les forces armades per tal de produir bombes d'hidrogen, que en realitat són, bombes de triti. Però aquestes bombes necessiten una gran quantitat de triti, i per no extreure'l directament de l'aigua, on té poca presència, simplement es desintegra Liti-6 amb neutrons en un reactor per aconseguir-ho. Però degut a la vida mitjana del triti, aquests reactors necessiten recarregar periòdicament amb liti per poder aconseguir la massa crítica i així que la bomba sigui viable. En últim lloc tenim una curiositat sobre el triti, que són les llums "eternes". Aquestes llums solen ser molt comuns ja que normalment són conegudes com varetes de llum o també es pot trobar en algun penjoll o clauer. La producció de llum es deu a que l'electró que s'allibera de l'àtom es dirigeix cap a un fòsfor on està contingut el triti (a 18,59 KeV) i activa aquest produint llum visible que és la que nosaltres veiem i fa l'efecte tan bonic. Aquesta reacció pot durar 20 anys depenent de la quantitat de triti contingut, per això es pot dir que l'efecte és "etern". Per una altra banda el color que adopti el fòsfor dependrà de què estigui format, però normalment sol estar fet de Sulfur de Zinc (ZnS) que dóna una llum blava, però es pot dopar aquest sulfur amb diferents elements perquè canviï de color. Com a última curiositat del triti també pot formar molècules d'aigua i així formar l'aigua hiperpesada, però és molt poc comú per l'abundància del triti en la natura.

2.4.4. Isòtops inestables.

Ara que hem vist tots els isòtops estables de l'hidrogen, explicarem breument quatre isòtops concrets que tenen una massa superior al triti, sent així altament inestables. Aquests isòtops no es troben de manera natural a l'univers i fins ara sol s'han pogut sintetitzar al laboratori, tenint una vida mitjana de no més d'un Zeptosegon (10^{-21} segons) i per tant tan sols s'ha pogut deduir mitjançant d'experiments la seva existència. En el laboratori s'han pogut sintetitzar des de l'Hidrogen- fins l'Hidrogen-7; sent el més estable el ^5H i el més inestable el ^7H .

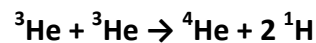
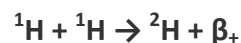
- **Hidrogen-4** és l'isòtop de l'hidrogen format per un protó i tres neutrons. Es sintetitza en els laboratoris bombardejant àtoms de triti amb nuclis de deuteri a alta velocitat. En aquestes experiències el nucli de triti capta un neutró del nucli de deuteri adquirint així una massa atòmica de 4,0278 u. Es desintegra per emissió de neutrons i té una vida mitjana de $1,30 \times 10^{-22}$ segons.
- **Hidrogen-5** és el més estable dins de la inestabilitat, està format per un protó i quatre neutrons. S'obté a partir del bombardeig de nuclis de triti a altres àtoms de triti, on un capta dos neutrons. Aquest isòtop decau mitjançant una doble emissió de neutrons i té una vida mitjana de $9,1 \times 10^{-22}$

- **Hidrogen-6** s'ha detectat aquest isòtop però no se'n sap gran cosa més. Sol que posseeix un nucli d'un protó i cinc neutrons i que la seva vida mitjana es de $2,9 \times 10^{-22}$ segons.
- **Hidrogen-7** és un isòtop que té un protó i sis neutrons. Es va detectar al laboratori de feixos "RIKEN" on es va bombardejar hidrogen amb Heli-8, on els neutrons de l'heli són donats al nucli de l'hidrogen.

2.5 Abundància de l'hidrogen.

Respecte a la totalitat de l'univers, l'hidrogen és l'element més abundant, amb un 92% de representació en aquest en massa de la matèria coneguda. Conté un 7% d'Heli i tan sols queda un 1% per a la resta d'elements.

Això és degut a que l'hidrogen és el combustible de les estrelles, que al tenir una massa tan elevada, explica el perquè d'aquesta abundància. L'hidrogen es podria considerar el sistema d'emmagatzematge per excel·lència de l'univers, i sobretot de les estrelles joves, com el nostre Sol, que a través de reaccions nuclears aconseguen energia i com a producte d'aquesta fusió l'heli, explicant així l'abundància d'aquest element respecte a la resta. Dues de les reaccions són les següents.

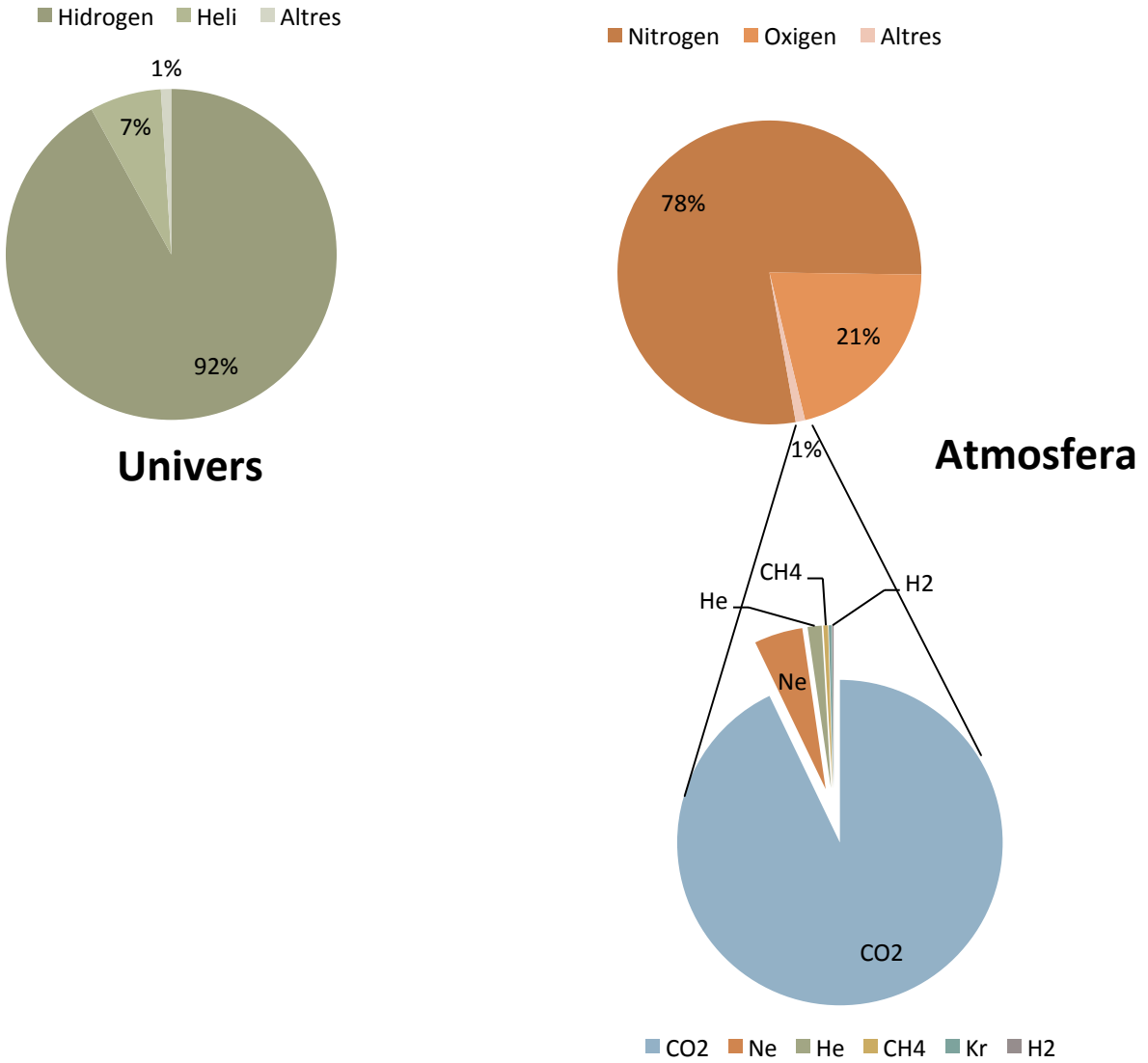


Però pel que fa a la terra, l'hidrogen és el desè element més abundant. Curiosament és poc abundant en l'atmosfera ja que degut a la seva poca massa i densitat les forces gravitatòries no el poden retenir i es desprèn d'aquesta.

El poc hidrogen elemental que podem trobar, ho fem en l'estratosfera; però la resta d'hidrogen que trobem a la terra es fa en forma molecular o H_2 . L'anomenat dihidrogen, o simplement hidrogen tampoc és molt abundant en l'atmosfera terrestre, és més, l'hidrogen forma part del 1% d'altres elements que no siguin N_2 (78%) o O_2 (21%). Com veurem en el següent apartat l'hidrogen molecular és també un gas incolor i inodor que és menys dens que qualsevol altre gas ($8.99 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm}^3$).

Pel que fa a la resta de la terra que no és l'atmosfera, no es troben ni l'hidrogen gasós ni en forma elemental, sinó que l'hidrogen es troba formant compostos amb altres elements. El més comú i el que cobreix la major part de la terra és l'aigua (H_2O), a més d'altres compostos orgànics que descriurem breument més endavant.

Pel que fa als essers vius, i per extensió als humans, l'aigua és el major component del nostre cos (70%) encara que pot variar depenent de l'espècie, a més de formar hidrocarburs amb el carboni del que estem compostats. A continuació uns gràfics comparatius entre l'abundància en l'univers (verd) i l'abundància en la terra (taronja). En l'escorça terrestre es pot considerar quasi negligible ja que l'element majoritari és el silici i l'hidrogen sols el troben en forma d'hidrurs i altres compostos que no són ni l'hidrogen elemental ni el dihidrogen.



3. Estats naturals de l'hidrogen

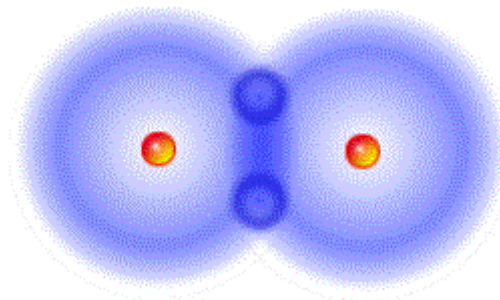
Hem vist les característiques generals i més importants de l'hidrogen elemental, però com hem pogut comprovar, aquest tan sols es troba en petites quantitats a l'estratosfera, degut a la seva poca densitat atòmica. Però l'estat natural en el qual trobem l'hidrogen, i l'únic que és estable en la terra és el dihidrogen.

3.1. El dihidrogen o hidrogen molecular.

El dihidrogen és la molècula formada per dos àtoms d'hidrogen, on la seva representació es H_2 . Realment, en els processos de la terra no utilitzem l'hidrogen atòmic, sinó el molecular, per tant aquí rau la seva importància, ja que serà el que tindrà les aplicacions que descriurem posteriorment. Però ja hem dit que l'hidrogen molecular no es troba en grans quantitats en l'atmosfera, ja que la seva poca densitat molecular tampoc és suficient per sentir-se atreta per la força gravitatòria de la terra i mantenir-se dins de l'atmosfera terrestre. Per tant aquest problema de l'obtenció d'hidrogen per als processos també serà investigat més endavant.

3.1.1. Estructura i propietats.

Com tota molècula l'hidrogen molecular té la seva estructura i les seves propietats característiques. El dihidrogen es representa amb H_2 , i forma un hidrur que podríem anomenar "hidrur d'hidrogen", que són simplement dos àtoms d'hidrogen units per un fort enllaç covalent simple, on es comparteix l'únic electró de l'hidrogen. Cal esmentar que poden trobar-se molècules d'hidrogen molecular formades per altres isòtops que no siguin el protí, però al ser tan poc abundants en l'univers també es estrany trobar-los en forma molecular. Podem veure en la següent figura una representació dels orbitals i com comparteixen l'electró els dos àtoms d'hidrogen.



En la figura podem veure perfectament l'enllaç simple de l'hidrogen i els seus orbitals. Podem comprovar que és un molècula molt senzilla amb un enllaç simple. Encara així, al ser covalent i a més ser neutre, ja que posseeixen la mateixa electronegativitat, és una molècula molt estable amb una temperatura de dissociació molt elevada ($1.000^{\circ}C$), el que també suposarà un repte a l'hora d'utilitzar-lo en processos industrials.

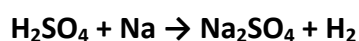
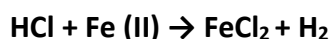
A continuació tenim una taula resum d'algunes de les propietats moleculars més significatives de l'hidrogen molecular:

Propietats moleculars	
Símbol	H ₂
Estat Natural	Gas
Pes Molecular	2,016
Temperatura de fusió	-259,13 °C
Temperatura d'ebullició	-252,8 °C
Densitat gas	0.08342 Kg/m ³
Densitat líquid	70.96 Kg/m ³
Entropia	130.680 ± 0.003 J·mol ⁻¹ ·K

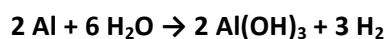
3.1.2. Síntesi al laboratori.

Les primeres reaccions amb la intervenció de l'hidrogen van ser a petita escala, encara que més tard comentarem la síntesi industrial, cal aturar-se un moment a veure com es sintetitza a petita escala.

L'hidrogen (H₂) pot obtenir-se de la majoria, per no dir totes, les reaccions d'un àcid amb un metall qualsevol, ja que al reaccionar un metall amb un àcid s'alliberen protons que s'uneixen per formar hidrogen i la resta de l'àcid s'uneix al metall per formar una sal, a continuació tenim una reacció genèrica i uns quants exemples de reaccions àcids-metall:



Cal esmentar el cas de l'alumini que no sol quan es tracta amb un àcid crea hidrogen, sinó que simplement interaccionant amb aigua ja en crea:



Hi ha moltes altres maneres d'obtenir hidrogen (electròlisi, reformat de vapor..) que ja explicarem més detalladament en el seu apartat corresponent.

4. Compostos de l'hidrogen.

Com ja hem vist anteriorment, l'hidrogen com a element i com a gas no és molt abundant en la terra, però tot hi així és un dels 15 elements amb més presència en ella, com s'explica això? La resposta està en la gran varietat de compostos que pot formar l'hidrogen i que són presents en el nostre planeta. Des de el compost més abundant: l'aigua, que cobreix un 71% de la superfície terrestre; fins a nosaltres mateixos que estem formats per compostos orgànics, basats principalment en carboni i hidrogen. A continuació veurem com i a què s'uneix l'hidrogen per formar la gran varietat de compostos que coneixem.

4.1. Els Hidrurs.

El primer tipus de compostos que ens trobem són els hidrurs. Són compostos binaris, és a dir que resulten de la combinació de dos elements, i en aquests l'hidrogen pot actuar en diferents estats d'oxidació. Depèn de com actui l'hidrogen, ja sigui com anió (H^-) o catió (H^+), es classificaran els hidrurs de diferent manera. Dintre d'aquesta classificació ens troben tres grans grups: els hidrurs salins o iònics, els hidrurs moleculars o covalents i els hidrurs metàl·lics. A la taula següent s'especifica quin tipus d'àtom formarà cada hidrur:

	1	2																18/VIII	
																			He
2	Li	Be												B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg												Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sr	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	

Salins
 Metàlics
 Intermedios
 Moleculares
 Desconocido

4.1.1. Hidrurs i l'enllaç iònic.

Els hidrurs salins o iònics, són uns compostos binaris, on l'estat d'oxidació de l'hidrogen es -1 . Per aquesta raó tan sols existeixen per als grups més electropositius de la taula periòdica: els alcalins i els alcalinoterris. Els hidrurs dels compostos alcalins són similars a l'estructura que presenta el NaCl, per tant formen sòlids no volàtils, cristal·lins i no conductors de la sal. Mentre que els hidrurs dels alcalinoterris són més similars a les estructures dels halurs de metalls pesants com el plom ($PbCl_2$); excepte el MgH_2 , que presenta una estructura tipus rútil (TiO_3). Per aquesta semblança a l'estructura de les sals, s'anomenen hidrurs salins.

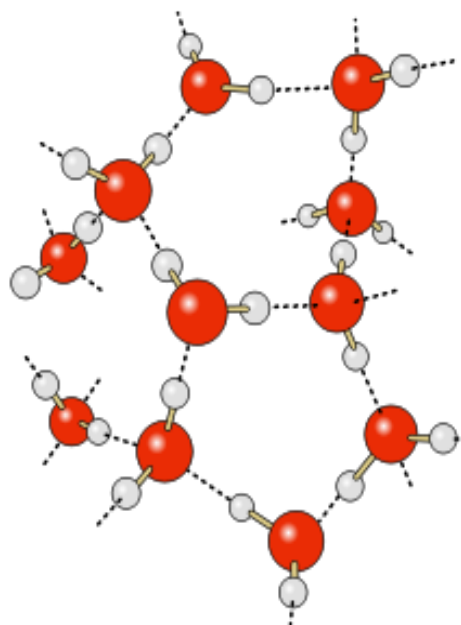
Els hidrurs salins són insolubles en dissolucions no aquoses, amb l'excepció dels halurs alcalins on són molt solubles. L'electròlisi dels hidrurs, que és el mètode de separació dels elements d'un àtom per mitja d'electricitat, dona H_2 en l'ànode amb presència de H^- . Encara que alguns hidrurs es descomponen abans de fondre's.

Els hidrurs salins, que solen ser uns sòlids blancs o grisos, s'obtenen generalment de la unió del metall amb l'hidrogen a altes temperatures. Aquests hidrurs s'utilitzen molt com a dessecants i reductors, com a bases fortes o alguns com a font de H_2 . Per exemple el CaH_2 , és un molt bon reductor dels òxids de qualsevol metall o també pot ser utilitzat com a dessecant de dissolvents orgànics. Per una altra banda el NaH reacciona molt violentament amb l'aigua, fins i tot inflamant-se amb la humitat ambient. Alguns hidrurs, com el NaH , poden ser utilitzats per formar altres hidrurs o altres agents reductors.

4.1.2. No metalls i l'enllaç covalent.

Els hidrurs moleculars o covalents es formen quan l'hidrogen s'uneix a algun element del grup **p** de la taula periòdica, formant així un enllaç covalent, ja sigui no polar o polar. Aquest enllaç de covalència es deu a que l'electronegativitat de l'hidrogen amb els elements del grup **p** és molt menor a la que tenen els elements del grup **s**. Solen ser substàncies discretes, majoritàriament gasos (NH_3 , CH_4 , $HCl...$) o líquids (H_2O). Els hidrurs covalents més importants són els orgànics, que estan formats per carboni, però ja els veurem més tard.

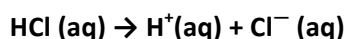
Els hidrurs covalents que no són orgànics estan bàsicament compostos per l'aigua (H_2O), l'amoniac (NH_3) i el fluorur d'hidrogen (HF). Encara que es puguin combinar amb més elements aquests són els majoritaris. Tot i que en aquest cas es tractin d'enllaços covalents també podem trobar una "càrrega" positiva creada per l'hidrogen, encara que no podem parlar de càrrega elèctrica neta ja que parlem d'un enllaç covalent. Degut a tenir aquesta "càrrega" positiva l'hidrogen es veu atret per la càrrega negativa d'altres molècules, formant així el famós enllaç intermolecular de pont d'hidrogen, que podem veure a la figura 1.5. Aquest enllaç es produeix entre molècules covalents no neutres. En aquest cas l'aigua forma un dipol entre l'oxigen i l'hidrogen: els àtoms d'hidrogen interactuen amb els d'oxigen d'una altra molècula d'aigua. Encara que els enllaços d'hidrogen són forts, sol ho són relativament, ja que l'enllaç més fort és el covalent.



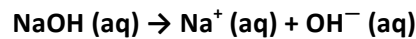
Àcids i l'hidrogen.

Molts compostos covalents o moleculars, sobretot el grups dels halògens (grup 17), formen els anomenats àcids binaris. Encara que es tractessin d'hidrurs en si són anomenats àcids pel seu comportament químic. Però abans anem a veure que és un àcid. Actualment hi ha dues teories que defineixen el terme àcid i el terme base químicament: una es la teoria d'Arrhenius i l'altra es la de *Brønsted i Lowry*.

La teoria d'Arrhenius enuncia que: un àcid és tota substància que en dissolució aquosa es dissocia formant ions H^+ . Per exemple:



I en cas contrari una base és tota substància que en dissolució aquosa es dissocia formant ions OH^- . Com per exemple:

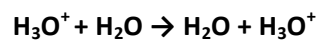


El problema d'Arrhenius era explicar el comportament acid-base dels compostos que no continguessin OH^- . Però aquest problema es solucionaria amb la definició d'acid-base de Brønsted i Lowry.

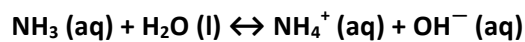
Segons Brønsted i Lowry un àcid és tota aquella espècie que pot donar protons a una altra. Això ens fa interpretar la ionització de l'àcid clorhídric d'una altra manera:



L'ió H_3O^+ , que és l'hidroni o l'oxoni, és un àcid molt fort ja que pot cedir molts protons. Igualment en una dissolució aquosa pot donar un protó a l'aigua però no tindria un efecte net per què:

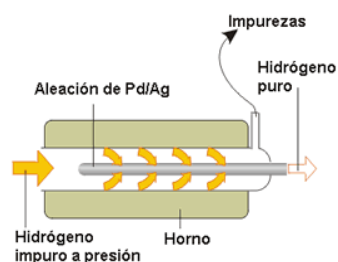


I per conseqüent una base Brønsted – Lowry serà tota espècie química capaç de captar protons d'una altra. Per exemple l'amoniac, que com explicarem més tard, és una base degut al seu parell d'electrons lliures.



Aquests conceptes els podem aplicar als hidrurs dels halògens i també als àcids terciaris o oxoàcids. Tots els halògens en dissolució aquosa es dissociaran ionicament donant un protó (o dos, depenent del nombre d'oxidació) i seran captats per l'aigua per formar la molècula altament àcida d'hidroni. Per tant aquestos hidrurs seran nomenats àcids, segons la nomenclatura tradicional. I aquí rau la importància de l'hidrogen en els àcids, ja que serveix com a mode o paràmetre per identificar un àcid o una base en el seu defecte.

4.1.3 Hidrurs Metà·lics



Finalment tenim un grup d'hidrurs ben especials, els hidrurs metà·lics, que són simplement la combinació de l'hidrogen amb algun, però no tots, els metalls de transició, o algun que altre lantànid o actínid. Com a curiositat els hidrurs dels grups 7 fins al 12 no existeixen, amb l'excepció dels hidrurs de Pd, Ni, Cu y Zn. Són compostos no estequiomètrics, és a dir que el nombre d'hidrògens que es combinen amb el metall no està regit pel nombre d'oxidació sinó aleatòriament. La seva naturalesa química encara no està molt clara però tenen un comportament metà·lic, solen ser sòlids trencadissos.

Una important característica de molts d'ells, és la gran mobilitat de l'hidrogen en el sòlid metà·lic a temperatures ambient lleugerament elevades. Aquests fenomen s'aprofita per la ultrapurificació de l'hidrogen a través d'un tub format per un aliatge de pal·ladi i plata, com podem veure en la figura 1.6 sent així els hidrurs metà·lics un mètode d'emmagatzematge d'hidrogen.

4.2. Estabilitat dels Hidrurs

No tots els hidrurs són estables termodinàmicament parlant, però tenim el grup dels hidrurs salins que al presentar una energia lliure de formació negativa són més estables. El tenir una energia lliure de formació negativa ens indica que la formació de l'hidrur serà espontània i per tant possible en condicions estàndard, però al ser positives, la reacció de formació d'aquests hidrurs no serà espontània, provocant que el compost sigui inestable respecte a altres energies lliures de formació. En la següent taula en podem veure algunes:

Energies lliures de formació dels hidrurs binaris (kJ/mol)						
Grup 1	Grup 2	Grup 13	Grup 14	Grup 15	Grup 16	Grup 17
LiH (s) -68,4	BeH₂ (s) +20	B₂H₆ (g) +86,7	CH₄ (g) -50,7	NH₃ (g) -16,5	H₂O (l) -237,1	HF (g) -237,2
NaH (s) -33,5	MgH₂ (s) -35,9	AlH₃ (s) -1	SiH₄ (g) +56,9	PH₃ (g) +13,4	H₂S (g) -33,6	HCl (g) -95,3
KH (s) -36	CaH₂ (s) -147,2	Ga₂H₆ (g) > 0	GeH₄ (g) +113,4	AsH₃ (g) +68,9	H₂Se (g) +15,8	HBr (g) -53,5
RbH (s) -30	SrH₂ (s) -141		SnH₄ (g) +188,3	SbH₃ (g) +147,8	H₂Te (g) > 0	HI (g) +11,7
CsH (s) -32	BaH₂ (s) -140					

La majoria dels hidrurs mostrats en la taula són inestables enfront a la descomposició del seus elements. En general podem observar que els elements més pesats resulten també ser els menys estables. Aquesta tendència general a l'estabilitat és un reflex principalment de disminució de l'energia dels enllaços E—H al baixar de grup.

4.3. Química orgànica de l'hidrogen.

Finalment ens trobem amb els compostos més importants per a la vida, els compostos orgànics. Encara que els més simples, com el metà, poden ser considerats hidrurs, per definició un compost orgànic és una molècula formada per llargues cadenes de carboni formant enllaços carboni-carboni. Poden contenir molts grups funcionals que continguin: oxigen, nitrogen... però quan parlem de compostos orgànics simples els carbonis es completen amb hidrogen, convertint-se així en alcans, alquens o alquins, depenen de la naturalesa dels enllaços que presentin aquests.

Però la importància d'aquestes llargues cadenes de carboni rau en la seves funcions biològiques, convertint-se així en biomolècules que són essencials per el manteniment de la vida en la terra. Aquestes biomolècules són: els glúcids, els lípids, les proteïnes i els àcids nucleics. Anem a estudiar breument la seva importància biològica.

Els glúcids, o carbohidrats, són la font primària d'energia del nostre metabolisme, és a dir ens donen l'energia immediata. Els lípids o greixos, tenen variades funcions en l'organisme, com funcions estructurals (fosfolípids), funcions de reserva energètica (triglicèrids) o funcions reguladores (esteroides). Les proteïnes, que són unes molècules molt grans, són molt importants per l'organisme, ja que tenen moltes funcions dins d'aquest. Les proteïnes tenen funcions: estructurals (col·lagen), reguladora (insulina), transportadora (hemoglobina),

immunològica (anticossos), enzimàtica (pepsina) etc. I finalment ens trobem els àcids nucleics que són molt importants, ja que contenen tota la informació biològica de cada organisme i són els responsables de la biosíntesi de les proteïnes.

Com podem comprovar les molècules orgàniques i les biomolècules són molt importants pel manteniment de la vida a la terra, ja que són imprescindibles per dur a terme els processos necessaris perquè la vida continuï.

MARC PRÀCTIC. APLICACIONS DE L'HIDROGEN

5. Aplicacions Energètiques

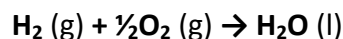
5.1 Combustibles no fòssils.

Potser, una de les aplicacions de l'hidrogen que s'està debatin més aquestos últims anys és la seva funció energètica, o millor dit, com a vector energètic. Es defineix com a vector energètic un dispositiu o substància que no pot donar energia directament, però que la pot emmagatzemar i alliberar d'una manera controlada. Els vectors es diferencien de les fonts d'energia primària en que es tracten de productes prèviament manufacturats i que s'ha invertit ja una quantitat d'energia en ells. Els exemples típics de vectors energètics són les piles o bateries que contenen l'energia però ja són productes manufacturats. L'hidrogen és un vector energètic molt interessant i la seva aplicació en el món dels recursos energètics podria arribar a substituir els combustibles fòssils. Aquesta aplicació energètica de l'hidrogen no és ni mes ni menys que la pila de combustible.

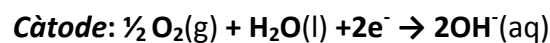
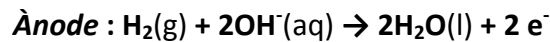
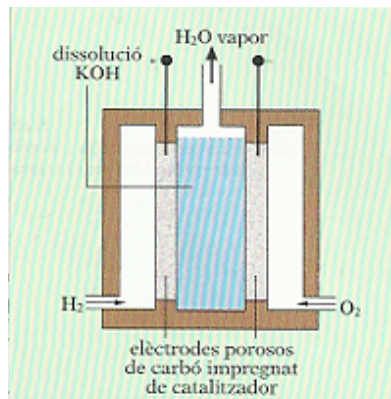
5.1.1 La Pila de Combustible

Les piles de combustible podrien suposar un canvi en la forma de consumir la energia, però què és una pila de combustible? Una pila de combustible és una cel·la electroquímica galvànica, és a dir les cel·les que produeixen energia elèctrica a partir d'un combustible químic. També poden ser anomenades reactors electroquímics, des del punt de vista de l'enginyeria química això vol dir que produeixen un corrent elèctric directament, sense cap reacció química convencional intermèdia, simplement es produeix un intercanvi d'electrons entre els reactius. Tampoc són considerats piles o bateries en si, sinó convertidors electroquímics, ja que les piles tenen una càrrega massa limitada que fa que sigui un sistema tancat, és a dir que quan s'acaben els reactius la pila queda inservible; en canvi les piles de combustible són un sistema obert, en les quals es poden subministrar de manera continuada els reactius. Des del punt de vista termodinàmic trobem un gran avantatge, ja que les piles de combustible no es veuen limitades pel cicle de Carnot, que és un cicle que ens permet calcular i comparar rendiments termodinàmics.

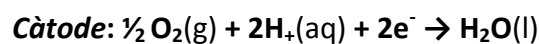
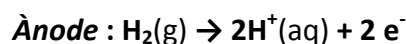
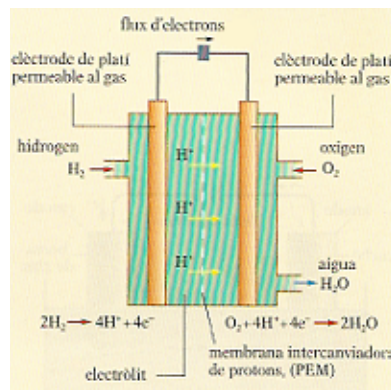
Les piles de combustible típiques funcionen mitjançant una reacció redox, on l'hidrogen és l'agent reductor i l'oxigen és l'agent oxidant per tal de formar el producte final que és l'aigua. Hi ha dues classes de cel·les o convertidors electroquímics d'aquest tipus : les piles de combustible alcalines i la pila de combustible d'electròlit polimèric (PEM). Segons el tipus de pila trobarem una reacció o una altra, encara que el resultat segueix sent el mateix i les dues reaccions redox no difereixen tant. En tot cas la reacció global és:



La pila de combustible alcalina va ser la primera que es va crear i a més va ser també la primera en alimentar les primeres naus espacials que van sortir de la terra. Són bastant simples: els seus elèctrodes estan formats de carbó porós impregnat en un catalitzador, que normalment sol ser níquel o òxid de níquel (II). L'electròlit, que és una solució iònica que conté ions lliures que formen un medi conductor elèctric, és normalment una solució d'hidròxid de potassi (KOH). A continuació es mostra una figura d'una pila de combustible alcalina amb les dues semireaccions en el càtode i l'ànode:

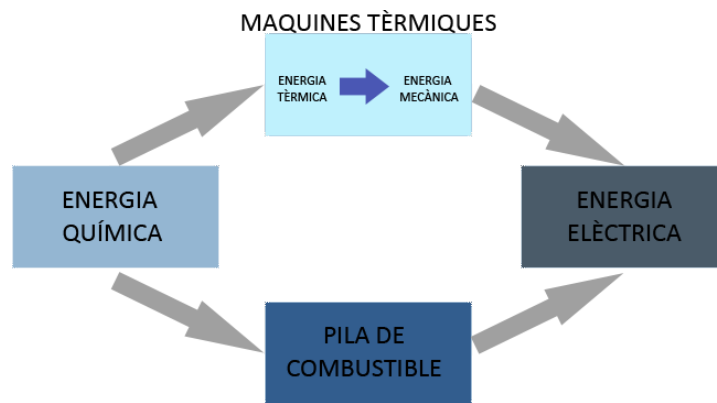


Per una altra banda tenim l'altre tipus de piles de combustible que són les d'electròlit polimèric o PEM. Els elèctrodes estan recoberts de platí, que és el catalitzador, i com el seu nom indica aquests elèctrodes estan separats per una membrana polimèrica que permet el pas de protons (H^+) a través d'ella però no d'electrons, permetent així que es moguin solament pel circuit elèctric extern. Així produeixen canvis en les semireaccions dels elèctrodes, però la reacció global segueix sent la mateixa:



5.1.1.1. Piles de combustible i producció d'energia elèctrica

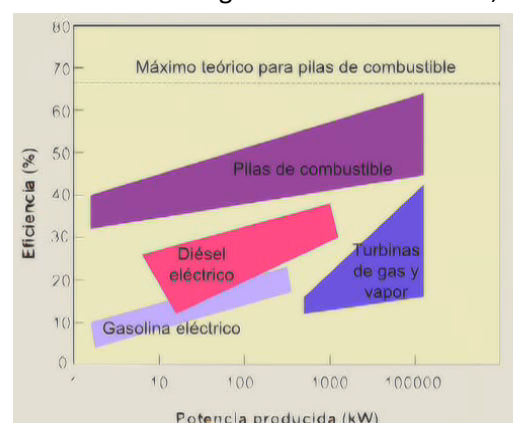
Per tal d'obtenir electricitat, moltes de les reaccions electroquímiques es produeixen de manera biològica i des de ja fa milions d'anys (anguiles elèctriques, bacteries, peixos gat...). Però realment, de manera científica, la pila de combustible no es va començar a investigar fins als segles XVIII/XIX període molt proper a l'aparició de la màquina de Watt. Tot i així aquesta via electroquímica es va aturar quan a finals del segle XIX es va optar per la via tèrmica com a mètode d'obtenció d'energia elèctrica de manera massiva. Però, més tard, al 1960 es va tornar a investigar la via electroquímica com a mètode d'obtenció d'energia per poder dur a terme els viatges espacials, ja que els hidrocarburs o altres combustibles fòssils no es podien utilitzar en l'espai, perquè la manca d'oxigen impedia la seva combustió. Així, i tal com ens mostra el diagrama següent, actualment tenim dues opcions a l'hora de produir energia elèctrica.



La més utilitzada actualment es la via tèrmica ja que és fàcil d'obtenir i de transportar. Però el gran inconvenient de les màquines tèrmiques és que es veuen limitades pel cicle termodinàmic de Carnot, un cicle que ens indica el rendiment màxim que pot tenir un sistema termodinàmic. Aquest cicle provoca que totes les màquines tèrmiques tinguin rendiments molt baixos i per consegüent, per obtenir una elevada quantitat d'energia es necessitarà "cremar" molt més combustible. Això no passa amb la pila de combustible, ja que com hem dit abans, aquesta no està limitada pel cicle de Carnot, aconseguint així uns rendiments molt més alts que les màquines tèrmiques. Això significa que la pila de combustible va un pas endavant respecte a les màquines tèrmiques, així que ara aprofundirem en els avantatges de la pila de combustible enfront dels combustibles fòssils.

5.1.1.2. Avantatges de la pila de combustible

Com hem dit anteriorment, les piles de combustible tenen un rendiment major que les màquines tèrmiques però, a més de tenir un espectre de rendiment molt més ampli, també tenen un espectre de potència elèctrica igualment ampli. Com podem veure a la gràfica 1.7, els combustibles tèrmics o fòssils, estan molt limitats. Per exemple si volem obtenir una potència de l'ordre de 10kW fins a 100kW, podem utilitzar la gasolina, però ja quan traspassem els 100, la gasolina queda inservible i haurem de utilitzar altres metodologies, com el diesel per obtenir potències més elevades. Però ja quan parlem d'obtenir energia de manera massiva, no podem utilitzar el diesel i entrariem en el territori de les grans centrals elèctriques (nuclears, gas natural...). En tot cas els combustibles tèrmics no superarien el 40% de rendiment (Teorema de Carnot). És aquí on les piles de combustible tenen el seu gran avantatge, poden ser utilitzades per obtenir qualsevol tipus de potència: des de watts (per una calculadora), fins a la producció massiva d'energia elèctrica. I en tot cas el seu rendiment mínim no baixaria del 30%.



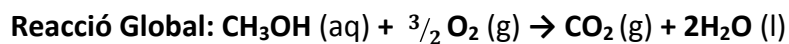
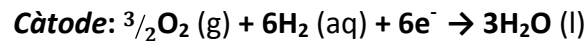
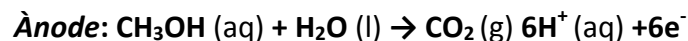
Però, tret de la gran eficiència de les piles de combustible respecte a les màquines tèrmiques, tenim altres avantatges en la seva utilització. El primer, i un dels més importants és que no emeten cap tipus de substància o gas contaminant, tant per l'ambient com per l'atmosfera, ja que al tractar-se de piles d'hidrogen la majoria de piles de combustible, l'oxidació de l'oxigen i

l'hidrogen tan sols produeix vapor d'aigua, que pot ser fàcilment recol·lectat i condensat, i calor. Tenen també una gran versatilitat, per exemple: tenen alta eficiència a carregues parcials. Això vol dir que podem fer-les funcionar a qualsevol potència, al 30, al 50 o al 100%, tot i així funcionaran a alts rendiments. A diferència de les turbines o màquines tèrmiques que no poden ser controlades tan fàcilment, ni tampoc parar-les o engegar-les quan es desitgi, les piles de combustible simplement quan s'hi subministri el combustible funcionaran. A més podem trobar molts altres avantatges respecte a la transformació d'energies.

Amb aquesta amplia llista d'avantatges sembla que tenim el futur de l'obtenció d'energia solucionat. Però no tot és perfecte en la pila de combustible, té alguns desavantatges que fan que de moment no sigui viable, industrialment, la seva producció massiva.

5.1.1.3. Inconvenients de la pila de combustible

A hores d'ara l'inconvenient principal de la pila d'hidrogen o de combustible, i el que està desaccelerant la seva producció, és el propi combustible. El problema de l'hidrogen, com ja hem vist en l'apartat corresponent, és la seva escassetat en la terra i per tant haurem de extreure'l d'altres llocs. A part, l'hidrogen té molts problemes a l'hora de transportar-lo i emmagatzemar-lo: ja sigui per la seva baixa densitat o per la seva reactivitat en presència d'oxigen. La solució al problema del transport, que ja explicarem més endavant, és transportar l'hidrogen en altres compostos i separar-lo en el lloc que es necessiti utilitzar-lo. Un mètode és la pila de combustible de metanol directe, on el seu combustible principal, i com el seu nom indica, és el metanol. Les reaccions que tenen lloc són:



Però extraient l'hidrogen d'una font fòssil com és el metanol tornem a estar al principi, si busquem una pila de combustible sense emissions de CO_2 i altres gasos nocius no podem utilitzar combustibles fòssils sinó altres vies, encara que cal destacar que el metanol no és tan contaminant com altres carburants més utilitzats. Actualment, aquest sistema de metanol directe s'utilitza per alimentar alguns autobusos urbans.

L'única alternativa, llavors la trobem en la molècula més abundant de la terra: l'aigua. Com explicarem més endavant, a partir d'un procés d'electròlisi podrem separar l'aigua en els seus elements per poder obtenir l'hidrogen i oxigen que necessitem per la pila de combustible. Però abans de parlar en profunditat de l'electròlisi de l'aigua, esmentem alguns altres inconvenients de la pila de combustible, que encara que no tinguin tanta rellevància, poden afectar al funcionament d'aquesta.

Per exemple, un d'aquests problemes és que es necessita d'un hidrogen de gran puresa per no causar cap problema amb el catalitzador. Si entressin impureses de sofre o monòxid de carboni a la pila, produirien un efecte en els catalitzadors de platí dels elèctrodes anomenat "enverinament". Aquest fenomen es deu a la sensibilitat del platí respecte a les impureses, i si es produís l'enverinament la pila no podria catalitzar bé la reacció de cada elèctrode i quedaria inservible. Un altre problema també es la manera en com s'emmagatzema el producte final de

la pila: l'aigua. Encara que explicarem més tard com es pot fer un circuit tancat amb l'aigua per aplicar-lo a l'automobilisme; és molt important emmagatzemar l'aigua d'una manera adequada, ja que sinó pot causar problemes a la pila inutilitzant-la. Com per exemple un escapament d'aigua que afectés als elèctrodes, o un deteriorament de les membranes polimèriques que són molt sensibles l'aigua.

Finalment ens trobem que els costos de fabricació resulten ser molt elevats, ja perquè requereixen una gran complexitat, o bé per l'elevat preu dels materials. Els components que s'utilitzen per fabricar les piles de combustibles no són barats, però amb el temps es poden reduir costos. Però el veritable problema són els catalitzadors (Platí, Rodi, Padmi) són molt cars degut a la seva escassetat i fins que no es pugin substituir per catalitzadors més assequibles econòmicament com es el níquel no es podrà reduir el cost de la fabricació de la pila. I per acabar les piles són pesades, ja que els elèctrodes són de grafit i són bastant voluminoses respecte a altres bateries, dificultant així les seves aplicacions.

Tot i els inconvenients, la fabricació de la pila de combustible suposaria un gran canvi en la manera de produir i consumir energia, a més de la seva gran versatilitat. Queda però, un gran camí en la recerca per tal de poder-les fer viables a gran escala. Cal dir també, que un dels problemes principals, la producció d'hidrogen quedaria solucionat amb un procés relativament simple: l'electròlisi de l'aigua.

5.1.2. Obtenció del hidrogen

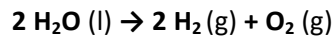
Un dels problemes que se'ns presenten a l'hora de fer funcionar les piles d'hidrogen és el combustible en si, com hem mencionat anteriorment. La terra no presenta jaciments o pous d'hidrogen, tal com els que hi ha de manera anàloga de combustibles fòssils, part tant haurem d'extreure'l d'altres fonts o productes. Aquesta característica era el que definia l'hidrogen com a vector energètic.

Actualment podem extreure hidrogen del gas natural (CH_4) en un procés de reformat per vapor, que explicarem més endavant. Però utilitzar combustibles fòssils, no soluciona el problema degut a la limitació que tenen. La solució és aleshores una font molt més abundant i barata: l'aigua.

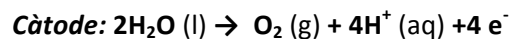
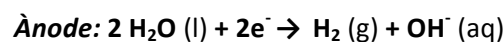
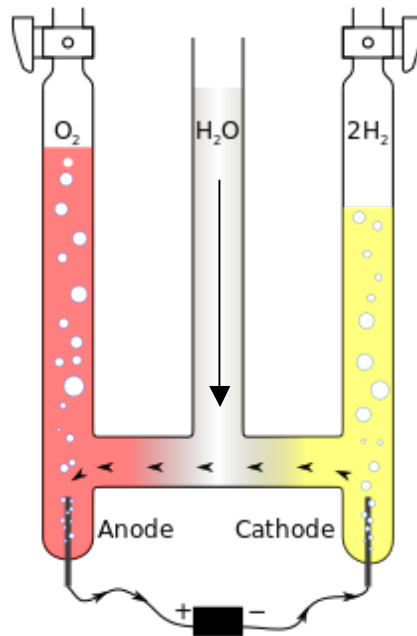
5.1.2.1 Electròlisi

L'aigua, H_2O , es pot separar en els seus elements bàsics: l'hidrogen i l'oxigen, mitjançant un mètode molt senzill, l'electròlisi. Aquest procés consisteix en separar els elements que formen l'aigua mitjançant un corrent elèctric. El muntatge, la recollida i el sistema són senzills; la dificultat o el problema el trobem en la baixa conductivitat elèctrica de l'aigua. L'aigua destil·lada té una conductivitat elèctrica un milió de vegades més petita que l'aigua maina (5). Aquest inconvenient tan sols es pot solucionar amb l'ús de un electròlit, que barrejat amb l'aigua, ajuda a la reacció d'electròlisi a accelerar-se. Normalment els electròlits utilitzats són sals iòniques, àcids o bases.

Anem ara a veure la reacció que es produeix en l'electròlisi de l'aigua. Justament coincideix en que és la reacció inversa de la que es dona en les piles de combustibles. En aquestes es produeix la reacció de formació de l'aigua amb l'alliberament d'energia; mentre que en l'electròlisi es produeix la dissociació de l'aigua en els seus elements amb un consum d'energia. La reacció global es la següent.



Al ser una reacció d'intercanvi d'electrons, es produiran unes semireaccions al càtode i l'ànode. En l'esquema següent podem veure un tipus de muntatge, per aconseguir dur a terme l'electròlisi, on podem apreciar la recollida dels dos gasos formats:



Però l'electròlisi té un inconvenient respecte al gas natural i altres mètodes d'obtenció d'hidrogen, ja que com podem veure en la següent taula requereix de molta energia:

	ΔH (kJ/mol)	$\text{T}\Delta\text{S}$ (kJ/mol)	ΔG (kJ/mol)
25°C	286,43	48,72	237,75
1000°C	249,87	72,17	177,66

Com podem comprovar a 25°C, es necessiten 237,75 kJ/mol, per tal de dissociar l'aigua, i la energia continguda en un mol d'hidrogen és de 241,82 kJ/mol. Per tant obtenim un balanç energètic de 1,02 kJ/mol. I encara que s'augmentés la temperatura fins a 1000°C el balanç tan sols augmentaria fins a un 1,36 kJ. Per tant podem concloure que l'electròlisi no es pot alimentar per si mateixa, és a dir amb l'energia continguda en l'hidrogen.

Utilitzar una energia elèctrica, provinent de la combustió d'hidrocarburs fòssils, ens deixaria amb el mateix deute de CO₂. Per tant hem de buscar formes d'energia renovables (solar, eòlica) per tal de poder subministrar l'energia necessària per poder fer de l'electròlisi una manera factible de separar l'aigua en els seus elements.

De moment l'electròlisi sembla l'única manera "neta" de separar l'aigua per tal d'obtenir els combustibles necessaris per la pila d'hidrogen, però actualment s'està treballant en nous catalitzadors i noves maneres d'extreure l'hidrogen de l'aigua com veurem en el punt següent.

5.1.2.2. Nous catalitzadors i Nous mètodes.

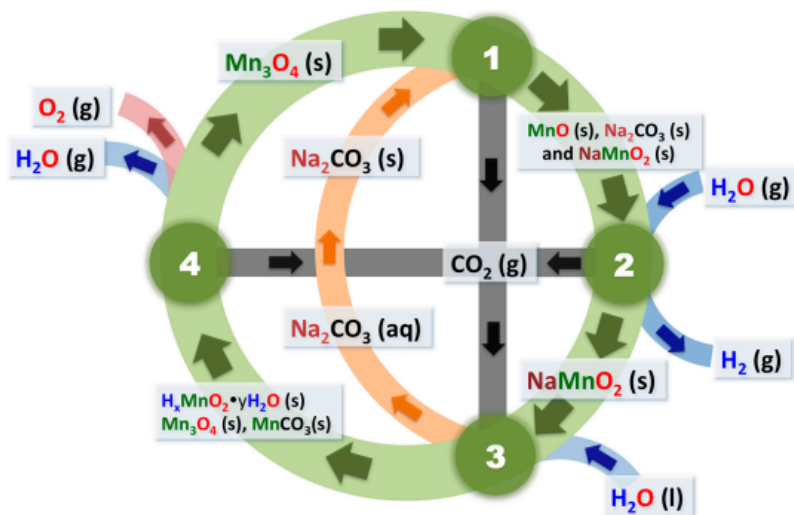
Com ja hem dit diverses vegades, hi ha diversos inconvenients en els processos esmentats que els fan de moment inviabilitats per a la producció a gran escala. Però la investigació constant de científics i enginyers fa que es vagi avançant en el camp de la tecnologia de l'hidrogen. Dues de les bones notícies que tenim d'aquestes investigacions són la trobada de nous catalitzadors pel procés d'electròlisi i potser una nova manera d'extreure hidrogen de l'aigua.

Com sabem, el procés d'electròlisi és un procés que necessita una font d'energia i un catalitzador per poder accelerar la descomposició de l'aigua. El catalitzador ideal és el platí, però degut a l'alt preu d'aquest (50.000 \$/kg) no es factible treure al mercat una màquina electrolítica amb catalitzadors de níquel. Però en aquets moments, científics del Laboratori Nacional nord-americà de Brookhaven, a Nova York, han desenvolupat un nou electrocatalitzador orientat a resoldre un d'aquests problemes. El nou catalitzador, essencialment nítrur de molibdè (MoN_3) i níquel en forma de làmines petites, permet generar hidrogen netament a partir de l'aigua i amb materials molt més econòmics.

Es pot destacar que el níquel i el molibdè són molt més barats que el platí com ha catalitzadors donant així bones perspectives econòmiques. A més la mescla de metalls ha donat uns resultats impressionants, apropant-se molt al rendiment de catàlisi del platí, donant molt bones expectatives als investigadors. Però com en tota investigació el que s'ha de continuar fent és experimentar amb els nous possibles catalitzadors.

Per una altra banda tenim un nou procés molt interessant. Hi ha molts mètodes, a part de l'electròlisi de l'aigua per obtenir l'hidrogen. Molts d'ells són a més de 1000 graus (en dos passos) i la resta a menys de 1000 graus es fragmenten en molts altres passos. Però l'equip de l'enginyer químic Mark Davis, de l'Institut Tecnològic de Califòrnia, es va proposar combinar el millor dels dos móns: utilitzar sòlids, com en els cicles d'altres temperatures, de manera que es poguessin evitar els problemes de toxicitat i corrosió associats als líquids, però també trobar una manera de reduir la temperatura.

Davis, Bingjun Xu i Yashodhan Bhawe han desenvolupat un cicle de quatre reaccions que comença amb òxid de manganès i carbonat sòdic. A continuació tenim un esquema del procés complet:



Podem veure que es un procés tancat on entra aigua i surt tan sols hidrogen i oxigen en la seva integritat. Podem desconfiar, però de la presència de CO_2 en el procés, però, com ens mostra l'esquema, el CO_2 no surt del cicle i s'utilitza per sintetitzar el carbonat de sodi (Na_2CO_3). Això és important perquè significa que no es perd res d'hidrogen i d'oxigen, i el cicle pot discórrer una i altra vegada, descomponent l'aigua en els dos gasos i no té cap emissió nociva a l'atmosfera.

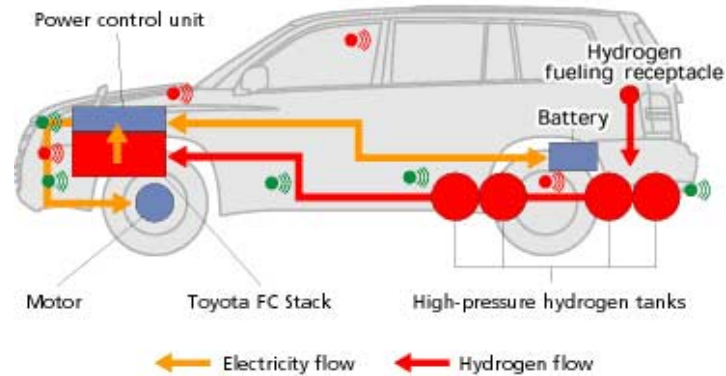
En les proves inicials, els investigadors han comprovat el bon funcionament d'aquest mètode executant el cicle un nombre limitat de vegades, i el propòsit final serà demostrar que segueix funcionant bé després de repetir el cicle moltes més vegades en el prototip de convertidor, el que demostrarà la seva eficàcia i demostrarà que es factible en la producció en massa d'hidrogen.

5.1.3. Aplicacions de la Pila de Combustible

5.1.3.1. Automòbils

Una de les aplicacions més importants de les piles de combustible és la seva utilització com a productors d'electricitat per a vehicles. Fins ara els combustibles fòssils ens resulten útils a l'hora de produir energia tèrmica, per tal de fer funcionar els motors de combustió o de diesel, però aquests són limitats. Una de les opcions en la qual més interès s'està posant ara mateix és en la utilització de la pila d'hidrogen com a font d'electricitat.

El funcionament és relativament senzill. S'han d'agrupar diverses piles de combustible en el vehicle per tal de poder produir energia, normalment no solen passar de les 36, ja que l'espai és limitat. Després simplement necessitem subministrar els elements primaris a la pila: l'oxigen i l'hidrogen; per tal que funcioni. La resta funciona com un cotxe elèctric convencional. L'electricitat es condueix cap al motor, que convertirà l'energia elèctrica dels electrons alliberats en energia mecànica rotatòria per tal de moure el vehicle. Podem veure un esquema d'un prototip del vehicle en la següent figura.



Sembla un procés molt fàcil i s'ha comprovat que un cotxe que aconsegueix energia a través de la pila d'hidrogen té una dependència de 460 Km; una molt bona mitjana. Cal destacar que arriba a velocitats similars a les dels cotxes de combustió normals, fins a 160 km/h. Però així com la pila de combustible presenta els seus inconvenients, el cotxe d'hidrogen també.

Començant per la manera d'obtenir l'hidrogen: en aquest punt tornen a trobar-nos el dilema de sempre; hi ha moltes maneres d'obtenir hidrogen: electròlisi, reformat per vapor... està clar que la més neta i "renovable" és l'electròlisi, ja que no intervé cap tipus de combustible fòssil que pugui alliberar CO₂ o altres gasos en l'atmosfera. Per tant la solució vindria donada per un cotxe que s'autoalimentés d'ell mateix. És a dir que de l'electròlisi de l'aigua (amb una energia inicial produïda per exemple, amb plaques solars), separés l'aigua en els seus elements i entressin a la pila per donar un corrent elèctric i aquesta aigua podria ser reutilitzada per començar el procés un altre cop. També es poden obtenir d'altres processos que no impliquin l'electròlisi, que a hores d'ara és una manera poc rendible de produir en quantitats industrials. Però ja hem dit que si no ho fem a través de l'electròlisi, el més probable és que es produeixi CO₂ i per tant no arribaria a ser una solució: ni a les emissions contaminants a l'atmosfera, ni a la limitació de combustibles fòssils.

A part hi ha un parell més de problemes com són la puresa de l'hidrogen i la forma d'emmagatzemar l'aigua. El primer es resumeix simplement, en que els catalitzadors, sobretot els de membrana polimèrica són molt sensibles si es trobessin impureses en l'hidrogen i aleshores quedarien inútils. Per una altra part també hem de tenir en compte l'emmagatzematge d'aigua resultant en la pila de combustible. Si és un sistema tancat d'electròlisi – pila no hi cap problema, però en cas contrari es requereix un lloc on emmagatzemar l'aigua produïda, ja que no es pot anar per la carretera deixant anar aigua. Finalment, hem de tenir en compte que la pila de combustible i els materials, a part de que requereixen un muntatge especial, són costosos i per tan augmenten el valor del vehicle en general. Encara que si es trobessin nous materials, més barats i que duguessin a terme la mateixa funció aleshores el preu baixaria.

De tota manera, encara s'ha d'experimentar i crear nous prototips amb nous tipus de piles per tal que tots els problemes i dificultats del cotxe d'hidrogen es solucionin i per tant puguem tenir una alternativa factible als cotxes de combustió o diesel actuals.

5.1.3.2. Altres aplicacions

A més de tenir l'enormement estesa funció com a motor de vehicles, les piles d'hidrogen tenen altres utilitats que, com veurem a continuació, són molt útils en la nostra vida diària.

Combustible de Coets

És molt interessant saber que les primeres piles de combustible (alcalines), no van servir per alimentar un vehicle de la terra ni pel consum humà. La primera pila d'hidrogen, va ser utilitzada com a medi de producció d'energia elèctrica dels coets i estacions aeroespacials. La NASA va començar a utilitzar cel·les de combustible alcalí en els coets Apollo. Aquests utilitzen un electròlit d'hidròxid de potassi que funciona a temperatura ambient amb una eficiència elèctrica del 60 al 70 %.

Això es deu en gran part a la manca d'oxigen en l'espai fora de l'atmosfera terrestre. Si l'espai exterior contingués molta quantitat d'oxigen que poguéssim extreure i per tant combustionar els hidrocarburs (gas natural p.e.) podríem obtenir energia. Però quan ja no hi ha oxigen del qual alimentar-se, la nau ja no pot basar-se en la combustió de compostos orgànics, ja que gastar l'oxigen que necessita la tribulació per viure en obtenir energia seria inviable i arriscat. Per tant l'única solució que van veure viable per tal de produir electricitat en l'espai va ser la pila de combustible.

Normalment l'hidrogen primari que necessitem prové de l'electròlisi de l'aigua, la qual es duu terme a partir de l'energia solar que capten les plaques que estan instal·lades en la nau. Els elements de l'aigua, ja separats, entren en la pila i es produeixen les reaccions químiques ja esmentades. L'avantatge d'utilitzar piles de combustible a l'espai és que aquestes sol produeixen aigua, i aquesta pot ser utilitzada novament per obtenir energia o bé per ser utilitzada per la tripulació. Per emmagatzemar hidrogen també s'utilitza hidrogen líquid, que com veurem més tard ens permet emmagatzemar més quantitat que l'hidrogen en forma de gas però té els seus inconvenients.

Per tant podem concloure, que sense la tecnologia de les piles de combustible, el més probable és que mai s'hagués pogut trobar un substitut dels combustibles fòssils per poder generar energia elèctrica a l'espai i per tant, els viatges interestel·lars s'haguessin endarrerit molt.

Habitatge i cogeneració.

En el cas de l'habitatge les piles de combustible tenen una aplicació molt clara: produir energia. És un ús estacionari ja que consistiria en tenir una pila en cada casa. Així la pila estaria connectada a una canonada que subministres hidrogen, aigua o gas natural; depenent de la font primària que es vulgui utilitzar. Però a part de ser ideal per generar electricitat, seria una bona idea utilitzar una pila que generés molta calor, ajudant a escalfar també l'aigua produint així un sistema electricitat-calor, que tan sols estaria mogut o activat per una sola pila de combustible.

El procés d'obtenir energia tèrmica i elèctrica a la vegada, s'engloba dintre d'una aplicació anomenada cogeneració. La cogeneració, consisteix simplement en utilitzar una pila de combustible que alliberi quantitats importants de temperatura i utilitzar aquesta calor alliberada per altres usos energètics. Per exemple l'energia tèrmica es podria utilitzar per alimentar uns altres generadors (turbines) per tornar una altra vegada a obtenir energia

elèctrica. També, com el cas esmentat anteriorment, aprofitar aquesta energia tèrmica directament per alimentar calderes.

Com podem veure les piles de combustible tindrien un impacte molt important en les nostres vides, a més del medi ambient. La seva senzillesa podria donar solució a molts problemes actuals, però això s'analitzarà en posteriors apartats.

5.2. Combustibles fòssils.

A part de les seves múltiples aplicacions com a vector energètic del futur, l'hidrogen també té aplicacions contemporànies en la indústria petroquímica actual. Un dels processos més destacables és la seva utilitat com a refinador de petroli en altres productes derivats d'aquest (ja sigui gasolina o altres combustibles). Aquest procés on el petroli es refina es coneix com a cracking amb hidrogen o simplement hidrocracking.

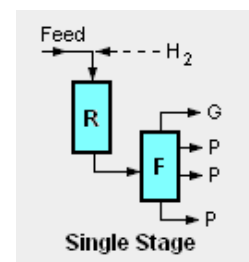
5.2.1 Refinats de petroli - hidrocracking

Actualment la majoria de centrals refinadores de petroli utilitzen un sistema de craqueig catalític de fluids, un sistema molt convenient i eficaç per a la refinació de petroli. Però quan ja no es pugui utilitzar aquest sistema, que fem? El hidrocracking és la resposta. Es tracta d'un procés on es converteixen molècules molt pesants, que tinguin un alt punt d'ebullició, que estiguin saturades de nitrogen o sofre, o que continguin molècules aromàtiques; en productes molt més útils per a la indústria com són: la gasolina, el querosè (combustible per avions) o diesel.

El hidrocracking és un procés molt complex, on intervenen molts catalitzadors, moltes condicions i on moltes estructures hi estan implicades. Això provoca que sigui molt complicat separar-ho en fases. Igualment existeixen tres tipus d'hydrocracking.

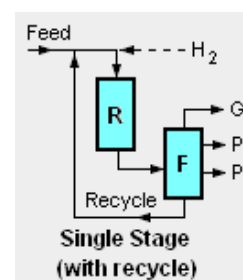
Hidrocracking d'una fase sense reciclatge

La primera configuració és la més senzilla de totes. Consisteix en un sol reactor amb llits de catalitzadors on s'introdueix el producte primari o petroli. Tot el producte que no s'hagi craquejat en la reacció no és reciclat i simplement s'elimina. Per a que aquesta manera de craquejar l'hidrocarbur funcioni, igual que passa amb el següent mètode, el combustible que s'introdueix al reactor ja ha d'estar lliure de qualsevol resta de sofre o nitrogen, perquè sinó podria afectar als catalitzadors que intervenen en l'hydrocracking o que el reactor ja sigui capaç de craquejar i hidrogenar els compostos de nitrogen i sofre a la vegada. Podem veure un petit esquema d'aquest mètode a la figura 1.8. on R representa el reactor; F el fraccionador; G els gasos sobrants i P els productes respectius.



Hidrocracking d'una fase amb reciclatge

Aquesta configuració és la que normalment es fa servir en la indústria. És idèntica a la primera configuració, el que passa és que tot l'hidrocarbur que no ha estat craquejat en el reactor, es recollit i tornat a introduir al reactor per ser craquejat novament. Una altra vegada el combustible que s'introdueix al reactor ja ha d'estar lliure de qualsevol resta de sofre o nitrogen o que el reactor ja sigui capaç de craquejar i



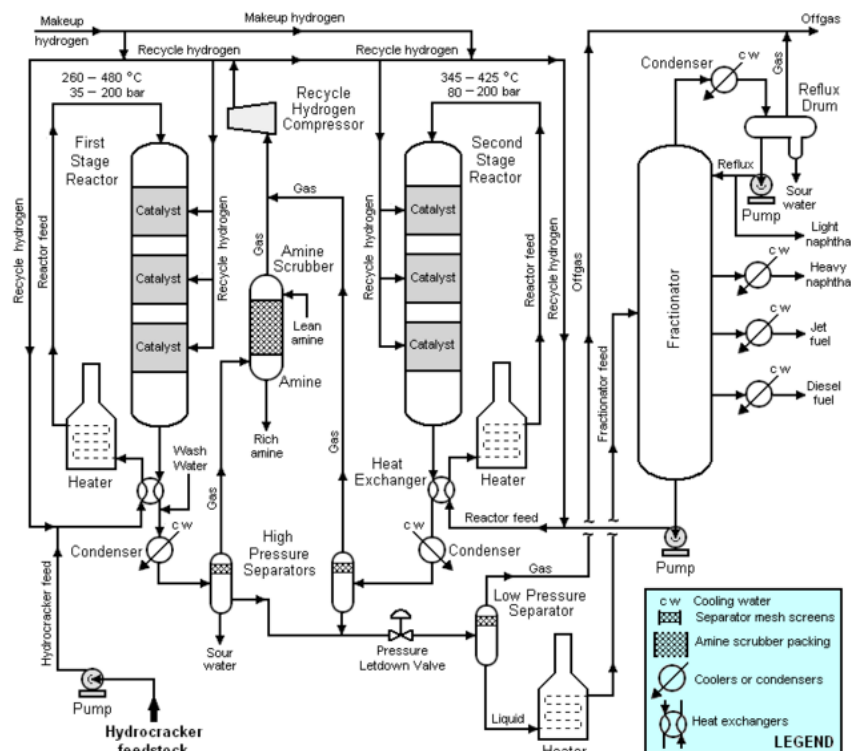
hidrogenar els compostos de nitrogen i sofre a la vegada. Podem veure un altre esquema d'aquest mètode a la figura 1.9 on R representa el reactor; F el fraccionador; G els gasos sobrants i P els productes respectius.

Hidrocracking de dues fases

Finalment trobem la més complexa de les configuracions. La diferència entre aquesta i les anteriors és que presenta dos reactors. De manera resumida les restes del craquejat són reciclades, però aquestes passen al segon reformador. Aquestes restes, a l'estar lliures de qualsevol impuresa de sulfats i nitrogen, ja que el primer reformador les ha eliminat, pot ser tornat a craquejar en el segon reformador. Com que els hidrocarburs que surten del primer i entren al segon reformador estan virtualment lliures de qualsevol impuresa, es poden utilitzar catalitzadors de gran noblesa, ja sigui platí o pal·ladi. Així que podem dir que l'hidrocracking de dues fases es resumeix en tres reaccions:

1. Craqueig d'hidrocarburs de gran pes molecular o aromàtics a altres molècules més senzilles.
2. Hidrogenar tots els hidrocarburs insaturats (alquens i alquins) per tal de transformar-los en alcans o hidrocarburs saturats.
3. Hidrogenar tots el compostos formats per sulfurs, nitrogen o oxigen per tal de transformar-los en sulfur d'hidrogen (H_2S), amoníac (NH_3) o aigua.

Cal dir també que totes les nombroses reaccions que es duen a terme en l'hidrocracking estan catalitzades. Aquests solen ser d'una base metàl·lica sòlida amb un suport àcid, i sempre tenint una doble funció de craquejar l'hidrocarbur i d'hidrogenar compostos. A continuació tenim un diagrama de flux on es pot veure detalladament el procés d'hidrocracking de doble fase, i ahora podem observar la seva complexitat.

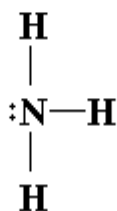


6. Aplicacions Industrials

6.1. Síntesi industrial d'amoníac

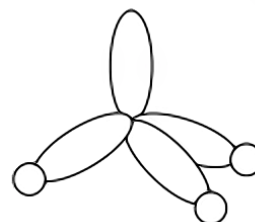
Una de les aplicacions més importants avui en dia de l'hidrogen és la formació d'amoníac. Aquesta indústria, que en principi no sembla massa important, en realitat dóna molts subproductes de molta importància per a la vida diària. La producció d'amoníac es pot fer de dues maneres: al laboratori o industrialment. Al laboratori es pot dur a terme mitjançant el contacte directe dels dos gasos que el formen o mitjançant altres elements, com poden ser els compostos d'amoní, que explicarem posteriorment. Però industrialment es fa servir un procés molt més rendible que el del laboratori, el procés Haber-Bosch, que és l'únic procés que s'ha utilitzat per a la producció d'amoníac al món, des que es va inventar fins avui en dia.

Estructura i característiques.



L'amoníac en sí és una molècula formada per un àtom de nitrogen i tres àtoms d'hidrogen, que normalment es tracta de protí, però també ens podríem trobar amb algun àtom de deuteri, en aquests cas l'anomenaríem amoníac deuterat. La seva fórmula molecular és NH_3 i es representa segons l'estructura de Lewis com en la *figura 2.1*. Cada hidrogen s'uneix al nitrogen en forma d'enllaç covalent, però el nitrogen es queda amb dos electrons sense compartir.

Per una altra banda la seva disposició geomètrica es representa com un tetraedre: l'estructura típica d'una hibridació sp^3 , deixant així dos electrons sense compartir en un dels orbitals híbrids i un electró en cada un dels orbitals restants, com es mostra en la *figura 2.2*. Aquests tres orbitals restants formaran enllaços tipus σ (**sigma**), l'enllaç més fort de tipus covalent, amb els àtoms d'hidrogen. Aleshores els angles dels enllaços H-N-H seran, aproximadament de 109.5° .



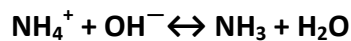
Pel que fa a les característiques bàsiques de l'amoníac, es podria dir que normalment es troba en forma de gas, incolor i amb una olor irritant o desagradable. És una substància molt soluble en l'aigua. També es considera una substància bàsica ja que és capaç de captar H^+ (teoria Brønsted-Lowry) i així formar l'ió d'amoní o NH_4^+ . Aquest caràcter bàsic de l'amoníac es pot explicar gràcies al parell d'electrons que poden ser cedits per formar altres compostos, també explicant així la formació de l'ió amoní.

Una dada curiosa és que l'amoníac es produeix gairebé en igual quantitat de manera natural, com a producte de l'acció dels bacteris sobre la putrefacció de la matèria orgànica, que com de manera industrial, per l'acció dels humans.

6.1.1. Producció d'amoníac al laboratori

Quan parlem de producció d'amoníac en petita escala, és a dir en el laboratori, podem parlar de dos tipus de processos amb els quals podem obtenir l'amoníac. Un és mitjançant el contacte directe entre els dos gasos (hidrogen i nitrogen) i un altre mètode que fa servir altres compostos que no són els gasos en si. Primerament veurem el segon mètode d'obtenció, que en realitat es el més simple.

La forma d'obtenció de l'amoníac al laboratori, en la qual no es necessiten els dos gasos és molt senzilla, però potser és el muntatge el que requereix un mínim de complexitat. L'amoníac, en aquest cas, s'obté mitjançant la interacció d'una base forta amb qualsevol sal amònica, com es representa en el següent esquema:

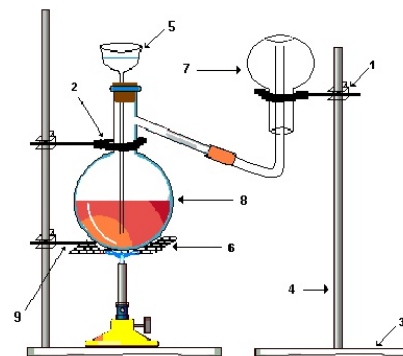


Però, realment els ions per si mateixos no poden presentar-se a la natura i per tant els que formaran part de la reacció anterior seran compostos de l'amoní i hidròxids. La reacció més utilitzada és la que duu a terme el clorur d'amoní i la sosa càustica, com es mostra en la reacció següent:



El procés a primera vista sembla fàcil, ja que tan sols fa falta disposar dels elements bàsics per poder mesclar-los i obtenir l'amoníac. Però com podem veure en la reacció, l'amoníac resultant sortirà en forma de gas, cosa que després dificulta la seva recollida. Per tant el procés al laboratori necessita un muntatge especial.

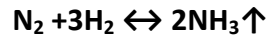
El muntatge es tracta d'un matràs (8), on es ficaran tots els reactius, i aquest matràs estarà connectat a un "globus" (7) on es recollirà el gas amoníac resultant de la reacció. També és necessari un bec Bunsen (6) per escalfar els reactius i així ajudar a la reacció a produir-se. A més, per comprovar que realment s'està formant amoníac seria necessari un indicador de PH humit, que a l'apropar-lo al gas es tornés de color blau. Així estariem segurs de que s'ha format l'amoníac. Podem veure un esquema del muntatge complet a la *figura 2.3*.



Aquest procés com podem deduir, no pot ser viable de cap manera en el món de la indústria, ja que el rendiment de la reacció no és molt alt, i a més és incomprensible utilitzar un producte del propi amoníac, com es l'amoní, per formar un altre cop l'element primari. Així que sembla que aquesta no és la manera més adequada de produir amoníac industrialment, sinó a partir dels seus elements com explicarem posteriorment.

El següent procés es basa en el contacte directe entre els dos gasos que formen l'amoníac: l'hidrogen i el nitrogen. Amb aquests processos que explicarem ara ens aproximem més a la forma actual de produir l'amoníac (procés Haber-Bosch), però encara així, aquests dos processos segueixen sense ser totalment viables, per unes quantes raons que esmentarem a continuació.

L'única diferència que hi ha entre els dos mètodes per formar amoníac a partir dels seus elements és el muntatge i la manera d'unir aquests dos gasos, però la reacció química que els uneix és la mateixa. Anem a veure-la:



Aquesta reacció, de manera natural és molt difícil d'aconseguir ja que, de per si, l'amoníac tarda molt en formar-se, això és degut a que l'enllaç covalent del N_2 és molt fort i difícil de trencar de manera natural. A més a més, com ens mostra el símbol d'equilibri de la reacció, encara que es formi l'amoníac també es pot descomposar en els seus elements primaris, per això podríem dir que aquesta reacció necessita unes condicions concretes i alguna ajuda especial per ser productiva industrialment.

Tornant a la producció al laboratori, la primera de la qual parlarem té un muntatge relativament senzill. Primer de tot necessitarem un tub d'assaig a l'inrevés dins d'un vas de precipitats, el qual contindrà aigua. Aquest muntatge és el que servirà per dur a terme la reacció. El tub d'assaig ha de contenir algun tipus d'indicador químic, que canviï de color, per tal de comprovar si se'ns ha format l'amoníac. Finalment, necessitarem dos elèctrodes dins del tub d'assaig per tal que puguin donar un corrent elèctric amb una espurna, és la que ens ajudarà a que la reacció es dugui a terme, unint els àtoms d'hidrogen i nitrogen.

Quan la preparació està completa el primer que fem és, com ens exposa la reacció, posar $\frac{1}{4}$ del volum en nitrogen i la resta, és a dir $\frac{3}{4}$, d'hidrogen. Aleshores, quan tenim tots dos elements dins del tub d'assaig donem corrent elèctrica als elèctrodes, que formaran una espurna. Aquesta espurna escalfarà el suficient les molècules d'hidrogen i nitrogen per a que es trenquin i formin amoníac. Aquest procés és molt lent, ja que pot durar hores fins que l'indicador canviï de color i comprovem que se'ns a format amoníac. Aquesta lentitud s'explica pel fet que l'espurna que ajuda a formar l'amoníac, també té la potència necessària per trencar-lo i descomposar-lo en els seus elements primaris.

Per tant podríem dir que aquest mètode utilitzant el corrent elèctric tampoc és factible industrialment, per tant haurem de buscar una manera d'accelerar la reacció, sense que es trenqui l'amoníac. Així és com passem a l'últim mètode per a produir amoníac al laboratori, abans d'explicar el procés Haber.

El segon procés al laboratori utilitzant els dos gasos que formen l'amoníac és ben diferent al que acabem d'explicar, no es basa en un corrent elèctric sinó en l'ús d'un catalitzador, que com veurem més tard és el que utilitza el procés Haber-Bosch.

En aquest procés al laboratori s'utilitza un tub d'assaig, posicionat de forma horitzontal, una mica ample amb dues xeringues als dos costats per mesurar volums de gasos. A més necessitarem que el tub d'assaig tingui una entrada i sortida per on puguem introduir els dos gasos i extreure'n l'amoníac. Al mig d'aquest tub hi trobarem un catalitzador, que no forma part de la reacció global, però sí que ajuda a que aquesta sigui més ràpida. El catalitzador més comú per formar amoníac és el ferro (Fe) o els òxids de ferro. Però aquest, a temperatura ambient no ajuda a que la reacció vagi més ràpida, doncs l'haurem d'escalfar amb un bec Bunsen perquè aquest catalitzador faci la seva funció.

El primer pas consisteix en mesurar els gasos amb les xeringues dels dos costats amb les quantitats que hem esmentat abans : una part de nitrogen i tres parts d'hidrogen. Aleshores, movent les xeringues, fem passar l'hidrogen i el nitrogen pel catalitzador i poc a poc se'ns anirà formant amoníac en forma de gas. Llavors extraiem el gas que s'hagi format en el tub horitzontal a través de la sortida que hi haurà en el tub i el posem en contacte amb un indicador químic que canviï de color per saber si realment s'ha format amoníac.

El problema d'aquests segon procés és el mateix que en l'anterior: les molècules d'amoníac es destrueixen a la vegada que es creen de noves per la naturalesa de la reacció. Això ens indica que no estem fent la reacció en les condicions apropiades per a que sigui viable. Per tant, el següent pas per fer la producció d'amoníac rendible a un nivell industrial, és trobar les condicions òptimes perquè la reacció doni la major quantitat d'amoníac, però que no es trenqui al mateix ritme; és a dir, que es formi amoníac més ràpid del que es trenca. Aquestes condicions òptimes són les que es fan servir en el procés més conegut i utilitzat en el món per la producció d'amoníac: el procés Haber-Bosch.

6.1.2 El procés Haber-Bosch

El procés Haber-Bosch és la implementació industrial dels experiments que hem esmentat abans, és a dir, el contacte directe de l'hidrogen i nitrogen gasosos. Avui en dia es el procés més utilitzat per sintetitzar amoníac de manera industrial en el món.

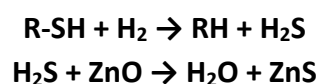
Aquests procés va ser patentat per Fritz Haber al 1910, però la patent va ser comprada per les indústries BASF alemanyes, que va donar a Bosch la missió d'augmentar de nivell la producció de sobretaula de Haber fins a un procés industrialitzat i rendible. Més tard Haber i Bosch van ser guardonats amb el premis Nobel de Química dels anys 1918 i 1931 respectivament per la seva ajuda en el món de l'enginyeria i processos químics en la indústria. Com a dada curiosa l'amoníac sintetitzat a través del procés Haber va ser utilitzat durant la primera guerra mundial com a precursor de l'àcid nítric, que més tard es transformaria en explosius.

Actualment, el procés que utilitza la indústria parteix del gas natural, format per un 90% de metà (CH₄), per a obtenir el H₂ necessari per sintetitzar l'amoníac. Però realment, les indústries que utilitzen el procés Haber, no sols comprenen la síntesi de l'amoníac, sinó que estan constituïdes per una cadena de processos, on primer s'obtenen els gasos primaris: l'hidrogen del metà i el nitrogen de l'aire; i després s'uneixen aquests gasos per formar amoníac. Per tant és molt important esbrinar d'on i com s'obtenen aquests gasos.

La producció d'aquests gasos és una cadena de fases i reaccions on, poc a poc, es van extraient les impureses fins que sols queden l'hidrogen i el nitrogen.

Dessulfuració.

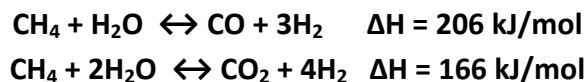
Com hem dit anteriorment, l'hidrocarbur que més s'utilitza per obtenir hidrogen és el metà, que és el component majoritari del gas natural. El procés Haber, requereix un gas de gran pureza, per això, hem de donar un èmfasi especial en l'obtenció de l'hidrogen per reformat de vapor. Però abans de començar tot el procés de reformat, és necessari eliminar qualsevol rastre de sulfurs, que són afegits per les empreses productores de gas natural per poder olorar-lo. La reacció es la següent:



Hem de tenir en compte que la R de la reacció és un radical (en aquest cas metà) i que conté un sulfur. La primera reacció consisteix en la hidrogenació del radical, obtenint àcid sulfhídric. Aquest element és tòxic, per tant es fa reaccionar amb l'òxid de zinc per a obtenir aigua i sulfur de zinc.

Reformat per vapor.

Una vegada que el gas no té cap impuresa, es sotmet a un reformat catalític de vapor d'aigua en el que es trenquen els enllaços de les molècules de CH_4 . Aquest gas natural es mescla amb vapor d'aigua en la proporció 1:3 i es condueix a la secció del reformat que té dues etapes. La primera s'anomena reformador primari, on es fa passar la mescla de gas i vapor d'aigua per uns tubs a 800°C on es duen a terme les següents reaccions:



Podem comprovar que són dues reaccions fortament endotèrmiques, per això necessiten unes temperatures tan altes i l'acció d'un catalitzador; en aquest cas l'òxid de níquel (NiO), per afavorir la producció de H_2 . Com es pot veure aquestes són dues reaccions molt similars, però realment una dona diòxid de carboni i l'altra monòxid de carboni, tots dos són gasos perillosos per a la síntesi d'amoniac.

Després del trencament de les molècules de metà ve la segona etapa del reformat de vapor, on el gas del reformador primari es mesclen amb un corrent d'aire i entra en el reformador secundari. D'aquesta manera aportem a la mescla de gasos una quantitat de N_2 perquè més tard es faci la reacció de síntesi. Cal destacar que el nitrogen s'extreu de l'aire perquè aquest està compost majoritàriament de nitrogen com podem veure en la *figura 1.4*. Per tant és lògic utilitzar l'aire com a font de nitrogen gasós. Per acabar el reformat secundari, les temperatures tan altes a les que s'arriben (1000°C) produeixen la combustió de les molècules de metà en una reacció exotèrmica que donarà més CO_2 i aigua.

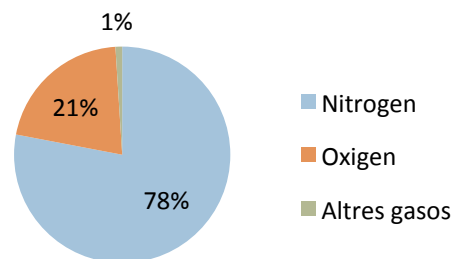


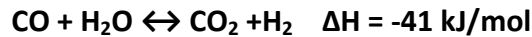
figura 1.4

Per resumir, al finalitzar l'etapa de reformat, tenim els percentatges de gasos aproximats de : N_2 (12,7%), H_2 (31,5%), CO (6,5%), CO_2 (8,5%), CH_4 (0,2%), H_2O (40,5%), Ar (0,1%) amb el que hem aconseguit una conversió de l'hidrocarbur inicial en un 99%.

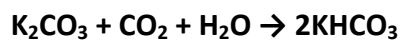
Purificació.

Ara ja tindriem els dos gasos necessaris per dur a terme la síntesi de l'amoniac, però el problema és que el procés requereix uns gasos de gran puresa, per tant hem d'eliminar les restes de CO i CO_2 , per tal que no interactuïn amb el catalitzador de l'amoniac i no el desactivin. Aleshores el següent pas del procés és la purificació.

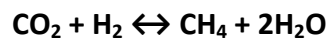
Primer de tot necessitem eliminar el CO, però com que no es pot fer directament el transformarem en CO₂, en la fase de conversió. El monòxid de carboni es transforma en diòxid en contacte amb vapor d'aigua en el convertidor seguint la següent reacció.



Aquesta reacció requereix un catalitzador que no es desactivi al contacte amb el CO. Per tant, perquè la reacció elimini totes les restes de CO, necessitem fer-la en dos passos. El primer a 400°C amb Fe₃O₄/Cr₂O₃ com a catalitzador; així aconseguim un 75% de la conversió. I després a 225°C amb un catalitzador més actiu, Cu-ZnO que pràcticament fa la conversió completa a CO₂. Ara que ja hem convertit tot el monòxid de carboni toca eliminar el CO₂. Aquesta eliminació es fa en unes torres amb diverses capes d'absorció de K₂CO₃ que està a contracorrent. Es forma KHCO₃ (Bicarbonat de potassi) segons la següent reacció.



El bicarbonat passa per unes torres a baixa pressió per que alliberi el CO₂. Com a curiositat aquest carboni alliberat en forma de CO₂, s'utilitza com a subproducte per a la fabricació de begudes carbonatades. Finalitzada aquesta etapa de purificació de gasos, ja només hauria de quedar nitrogen i hidrogen, però encara queden unes traces de CO (0,2%) i CO₂ (0,09%). Aquestes restes encara són perilloses pel catalitzador del reactor de síntesi per tant s'han de transformar en metà per així no posar en perill la reacció. Es duen a terme les següents reaccions sobre un llit catalític de níquel a 300°C.



Ara ja tenim uns gasos N₂ i H₂ de gran puresa y que sol contenen CH₄ i Ar que actuen com inerts respecte el catalitzador. Per tant podem ja passar a l'essència del procés Haber que és la unió dels dos gasos per formar amoníac.

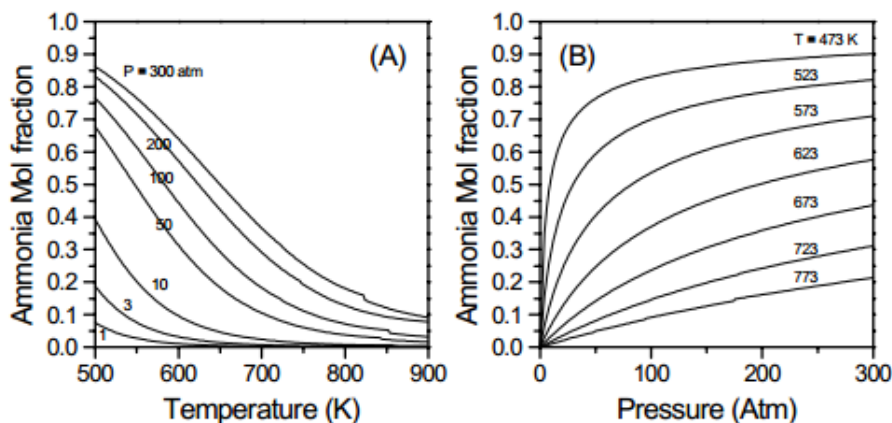
Síntesi de l'amoníac

En principi, ara que ja tenim els dos gasos essencials per a la producció d'amoníac, ja ens seria fàcil mesclar-los i que es formés el producte. Però hem de recordar la reacció química que ens comporta la síntesi d'amoníac:



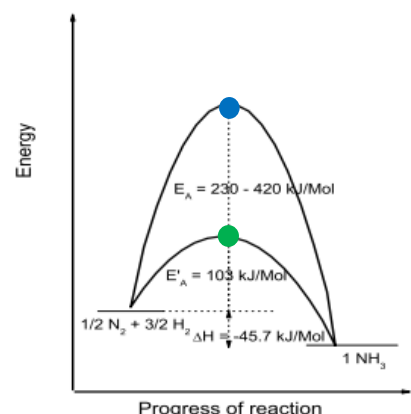
La formació de l'amoníac, com podem veure pel signe de l'entalpia, és una reacció exotèrmica, que allibera una quantitat considerable de calor. Com hem dit anteriorment, aquesta reacció es pot donar tant cap a un costat de la reacció com cap a l'altre. És a dir, es poden formar molècules d'amoníac (formació), però al mateix temps també es poden trencar (descomposició). Aleshores el procés Haber-Bosch busca dos objectius perquè la producció d'amoníac sigui industrialment rendible: incrementar la velocitat de reacció i desplaçar l'equilibri de la reacció cap a la formació de l'amoníac. El procés Haber, intenta donar una solució a aquests problemes, mitjançant el canvi de condicions i l'ús d'un catalitzador.

La reacció de síntesi ve acompanyada per un descens de volum que ve donat per un decreixement de mols gasosos. Incrementar la pressió farà que la reacció es desplaci més cap a la dreta i que es formi més amoníac del que es trenca ja que hi ha una caiguda de pressió que acompanya a la transformació (principi de Le Chatelier). La disminució de la temperatura també ajudarà a l'equilibri a posicionar-se cap a la dreta, ja que es una reacció exotèrmica. Com podem veure en la figura següent, els gràfics mostren l'efecte que té la temperatura i la pressió en la producció d'amoníac. Podem comprovar que quant baixa la temperatura puja la quantitat de mols; i quant puja la pressió, puja la quantitat de mols. Per tant, en conclusió, podem dir que la producció d'amoníac esta afavorida per les baixes temperatures i les altes pressions.



Però la part de l'equilibri químic és tan sols una part de la reacció, per poder saber si realment serà rendible en les condicions abans esmentades, hem de fixar-nos també en l'aspecte termodinàmic. Malauradament, la reacció de síntesi no es dona a temperatura ambient, ja que la temperatura de la dissociació del nitrogen és molt alta (3000°C), fins i tot l'hidrogen, que és una molècula que no necessita tanta temperatura; per dissociar-se li fan falta 1000°C. Per tant també és lògic pensar que la reacció de síntesi de l'amoníac es donarà a altíssimes temperatures. Però això és una gran contradicció amb el punt anterior, i ens porta fins a un camí sense sortida. L'única solució: el catalitzador. En el cas de l'amoníac, el més utilitzat és el Ferro (Fe) però que és promogut amb altres compostos com: Òxid de Potassi (K₂O), Monòxid de Calci (CaO), Diòxid De Silici (SiO₂) i Òxid d'Alumini (Al₂O₃). I com explicarem més endavant; en la formació d'amoníac es produeix una catàlisi per contacte o de superfície.

El catalitzador, com es pot veure en la figura 1.6. redueix l'energia d'activació de la reacció, on es pot reconèixer l'energia d'activació **amb** i **sense** catalitzador. Això es deu a que l'hidrogen i el nitrogen, perden els seus graus de llibertat de transició quan entren i s'uneixen amb la superfície del catalitzador i es trenquen per formar l'amoníac. Amb la catàlisi ens estalviem haver de fer un procés a altíssimes temperatures i, a més a més poc rendible, limitant així la quantitat de molècules d'amoníac que es trenquen. Tot i això no vol dir que es pugui fer la reacció en temperatures baixes, sinó que ha de

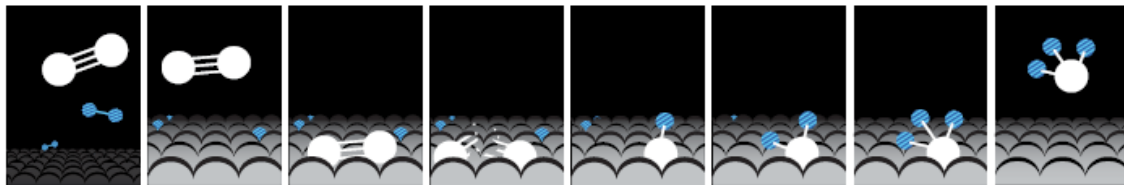


trobar-se entre 200 – 400 °C per que es dissociïn les molècules de nitrogen i hidrogen.

Hem de tenir en compte que encara que les condicions abans mostrades siguin les òptimes per dur a terme el procés Haber, amb aquestes tan sols obtindrem una rendibilitat de reacció del 15-20% però ara veurem com en un cicle tancat es pot augmentar la rendibilitat.

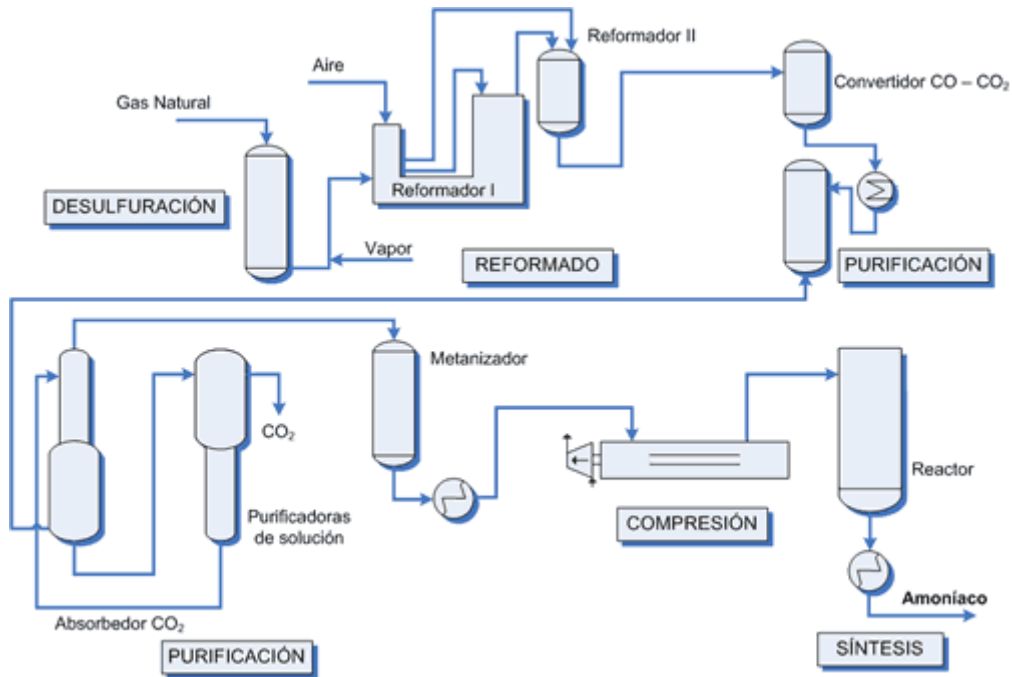
Recordem que ja teníem tots els gasos preparats per sintetitzar l'amoníac i que el procés de producció d'aquestos s'acabava en la purificació de les molècules que podrien posar en perill la catàlisi. I ara que tenim les condicions adequades per poder desplaçar l'equilibri cap a la dreta i formar l'amoníac és el moment de la síntesi d'aquest.

Primer de tot fem passar els gasos d'hidrogen i nitrogen per un compressor de turbina de vapor, per tal de comprimir-los a una pressió de 200 atm. Després es condueixen els gasos comprimits a un reactor que està a uns 400°C on es donarà la producció d'amoníac a través d'una catàlisi de superfície amb el ferro i els altres compostos minoritaris. Com hem dit abans el catalitzador ens ajuda a dur a terme la reacció en unes condicions, que en principi, no es podria donar. En aquest cas, el ferro té la funció de catalitzador de superfície que podem veure en la figura següent.

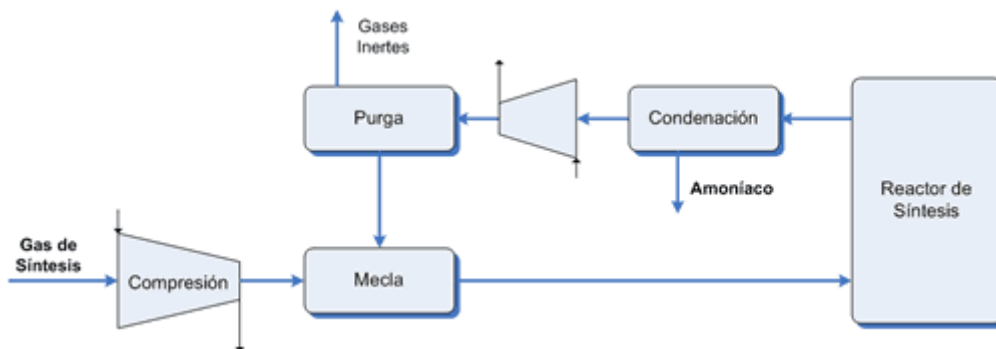


Podem veure que l'hidrogen (blau) i el nitrogen (blanc), interaccionen amb la superfície de ferro, que els trenca en àtoms senzills i després facilita la unió d'aquestos per tal de formar amoníac. Però fins i tot amb la catàlisi i fent-lo reaccionar en les condicions òptimes, amb una primera passada pel reactor tan sols obtenim entre un 15-20% de rendiment. Per tant la solució lògica és que en el col·lector d'amoníac, on es condensa a una temperatura de -33°C, els gasos que no han reaccionat (ja que l'hidrogen i el nitrogen tenen unes temperatures de condensació molt més baixes) es redirigeixen una altra vegada cap a l'inici del circuit i es fan entrar una altra cop al reactor. Així s'aconsegueix augmentar la rendibilitat fins a un 97%.

Ara en les figures 1.8 i 1.9 podem veure una representació gràfica del procés de reformat de vapor i de la síntesi d'amoníac, respectivament, on es veu perfectament representada cada fase del procés.



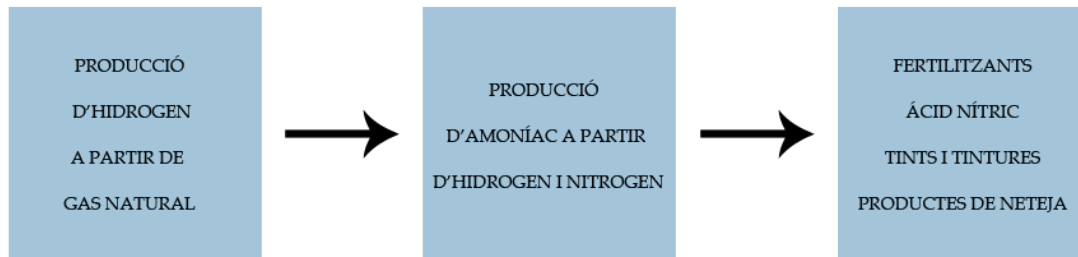
En aquesta figura podem veure el procés complet del reformat per vapor i un esquema simplificat del reactor de síntesi de l'amoníac.



I en aquesta figura podem veure el procés complet de síntesi de l'amoníac, on podem comprovar com es liqua l'amoníac i els gasos no reaccionats tornen una altra vegada al cicle.

6.2. Importància de la producció d'amoníac

Després d'haver explicat la producció a escala industrial de l'amoníac, ens hem de preguntar per què necessitem quantitats tan elevades d'aquest producte. Doncs l'amoníac resulta ser la matèria primera de moltes indústries que proveeixen de productes d'una importància extraordinària per a la vida diària de les famílies, com ens mostra l'esquema següent:



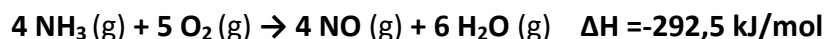
Com ja hem explicat en apartats anteriors l'amoníac prové del gas natural, però aquest amoníac, no serveix de gran utilitat de forma directa. Així que s'utilitza com a matèria primera d'altres indústries; la més important: la producció de fertilitzants. Més del 85% de l'amoníac produït en el món s'utilitza per produir fertilitzants, que són de gran importància per la agricultura i l'alimentació. Per una altra part l'amoníac s'utilitza per produir àcid nítric que després s'utilitzarà per fer explosius. També es fa servir com a diluïent de tints i tintures, ja sigui per a l'empresa tèxtil, com la d'estètica capil·lar. Finalment, una de les aplicacions és com a producte de neteja, utilitzats en gran proporció pels consumidors.

6.2.1. Producció d'àcid Nítric

Com ja hem dit l'àcid nítric és un compost que s'obté a partir de l'amoníac. Però aquest àcid per si sol tampoc té una utilitat vital per a la humanitat, sinó que és un precursor d'altres indústries com són la producció de fertilitzants i la fabricació d'explosius.

Primer ens centrarem en la producció d'àcid nítric mitjançant el procés Ostwald que és el que més s'utilitza avui en dia. Aquest mètode es basa en l'oxidació catalítica (amb platí) de l'amoníac a altes temperatures amb un excés d'aire. El procés consta de tres reaccions exotèrmiques.

La primera d'aquestes reaccions és l'oxidació catalítica del NH_3 a NO que es representa segons la reacció



Com podem veure és un procés exotèrmic, que és catalitzat per platí a altes temperatures (800°C) i a pressions entre 1-12 bar. Aquesta reacció pot ser una de les més eficients industrialment i també de les més ràpides (10^{-11} s) amb una alta selectivitat. En la següent taula podem veure les rendibilitats en relació a la pressió.

Pressió (bar)	Rendibilitat (%)
1	94-98
5	94-96
8-10	94

Podria semblar que aquesta part del procés Ostwald hauria de ser la més barata, però realment es la que l'encareix. El platí és un dels materials més cars que s'utilitzen (58 \$/g) a més en les condicions de treball d'aquesta reacció el platí es transforma en òxid (PtO_2). Per

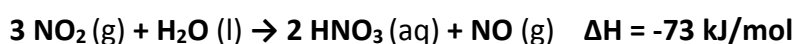
això el platí a de ser recuperat per absorció, reduint el costos en un 80%. Encara així s'han de gastar entorn a 50 tones de platí per reposar el que s'ha oxidat, costant així 2.184 milions d'euros a l'any. Per finalitzar aquesta fase del procés, hem de vigilar amb la concentració de NH_3 , que s'ha de mantenir per sota d'un 15,5% en la mescla perquè no hi hagi un perill d'explosió.

La segona fase del procés es l'oxidació del NO a NO_2 . La mescla resultant de la reacció anterior, que conte un 10-15% de NO es refreda. La temperatura alliberada es fa servir per escalfar aigua i el gas refredat es fa reaccionar amb oxigen atmosfèric per formar NO_2 segons al reacció:



Aquesta reacció es veu afavorida per baixes temperatures i grans pressions.

Per finalitzar el procés Ostwald realitzarem l'absorció del NO_2 en aigua que com podem veure és on es forma l'àcid nítric (HNO_3)



Ja hem sintetitzat doncs l'àcid nítric i les restes de NO que dona aquesta ultima reacció es reciclen tornant-les a oxidar amb oxigen en la fase anterior.

El procés Ostwald dona un àcid nítric aquós d'una puresa d'entre el 60-65% que és ideal per la producció industrial de fertilitzants, com és el NH_4NO_3 . Però per altres processos, com la nitració de compostos orgànics, es requereix un àcid nítric de gran puresa (98-99%) que es produeix mitjançant la reacció següent:

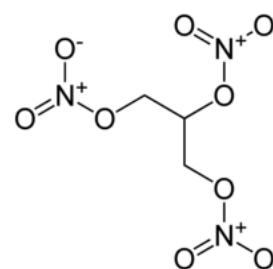


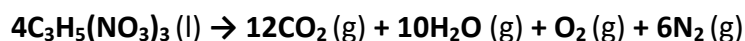
I encara que la reacció tingui el símbol d'equilibri, l'àcid produït per aquesta és gasós i per tant, a l'alliberar-se l'equilibri es desplaça cap a la dreta (Le Chatelier). Aquests gasos d'àcid nítric són més tard condensats; obtenint així un àcid nítric totalment pur. Però ja hem dit que aquest té aplicacions menys importants que el d'una puresa inferior.

5.2.1.1 L'àcid nítric i els explosius

Una de les aplicacions més utilitzades de l'àcid nítric és la producció de substàncies que són promotores dels explosius. Les dues més conegudes són la nitroglicerina que deriva a la dinamita i el trinitrotoluen (TNT).

Descoberta per Ascanio Sobrero al 1846, la nitroglicerina va ser un dels primers explosius. Amb la fórmula de $\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_9$, la nitroglicerina es sintetitza amb àcid nítric de gran puresa, àcid sulfúric i glicerina; i adopta una estructura molecular com es veu en la figura 2.1. Aquesta mescla d'elements, produeix un altre altament inestable i explosiu. A temperatura ambient és un líquid incolor, el que fa que sigui altament inestable a qualsevol moviment bruscat, dificultant molt el seu transport. A més quan arriba als 41°C explota violentament seguint la següent reacció:

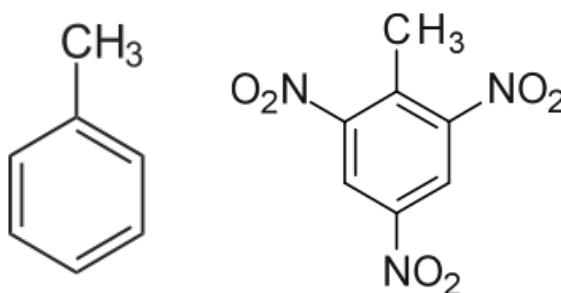




Encara que la nitroglicerina pot ser estabilitzada relativament afegint-li alguns elements com l'alumini, fou Alfred Nobel al 1866 qui va trobar una forma estable de la nitroglicerina creant la dinamita. Alfred Nobel, a través de perillosos experiments amb la nitroglicerina va solucionar la seva inestabilitat, fent que aquesta fos absorbida per un sòlid que la faria més estable. Principalment el sòlid que absorbeix la nitroglicerina és un tipus especial de sorra de diòxid de silici o diatomita o terra diatomea. Aquesta terra prové de fòssils submarins, té una gran superfície específica per absorbir la nitroglicerina, fent-la així més estable i més manejable. Gràcies a aquest descobriment, es va deixar d'utilitzar la nitroglicerina en els processos industrials, mineria i armament, facilitant molt les feines de demolició, excavació de muntanyes, construcció de carreteres... a més Nobel va inventar els detonadors que ajuden a precisar el moment en quan volem que detoni el nostre explosiu.

Com a dada farmacològica, la nitroglicerina ha estat molt utilitzada en medicina pel tractament de persones amb hipertensió, ja que és una molècula que dilata els vasos sanguinis. És molt útil per al tractament d'una angina aguda.

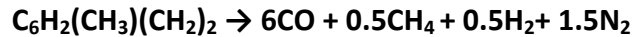
Per una altra banda, l'altre explosiu que deriva de l'àcid nítric és el TNT o trinitrotoluen. Es creu, erròniament, que el TNT forma part de la dinamita, però no es així, ja que el TNT és un compost en sí i la dinamita una mescla de nitroglicerina amb materials absorbents. La seva forma molecular és $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$. La seva producció és un anomenat three-step que consisteix en la nitrogenació d'un toluè per formar un nitrotoluen. Després es torna a nitrar per formar el dinitrotoluen, fins que finalment acabem de nitrar-ho tot i formem el trinitrotoluen. Es pot veure una representació de l'estructura del toluè sense nitrar i del trinitrotoluen a continuació:



El TNT va ser descobert per Joseph Wilbrand en el 1863, que va ignorar el seu caràcter explosiu i que l'utilitzava com a tint groc. El seu potencial explosiu no va ser detectat fins més tard, en part degut a la difícil detonació en comparació amb altres materials explosius. És tan segur i estable, que en el 1910 va ser retirat del *British Explosives Act 1875*, deixant de ser així, considerat com un explosiu a efectes de fabricació i emmagatzemament.

Pel que fa al seu caràcter com a explosiu, és d'ús general per a l'exèrcit i la indústria. És valorat per la seva insensibilitat davant d'una sacsejada elèctrica o la fricció, baixant el seu perill de detonació per error. A part, el TNT es pot mesclar amb altres compostos, ja que la seva temperatura de fusió (80°C), està molt per sota de la temperatura en la qual detonaria espontàniament. Això, com hem dit abans, afavoreix que es mescli amb altres compostos. Es pot mesclar amb un 20-40% de nitrat d'amoni, produint un explosiu anomenat amatol, que va ser utilitzat durant la 2a Guerra Mundial per ser més barat que el TNT i per tenir un caràcter

explosiu similar. Encara que l'amatol té els seus avantatges, no pot interaccionar amb l'aigua ja que l'absorbeix; perquè al ser mesclat el TNT amb el nitrat es torna hidròscòpic, fent així que no pugui entrar en contacte amb l'aigua. Per una altra banda tenim el minol que es fa mesclant el TNT amb òxid d'alumini, i va ser utilitzat pels britànics com a mines i càrregues de fons submarines. Quan el Trinitrotoluen reacciona i explota ho fa seguint les següents reaccions:



I en aquesta reacció es produeixen el següents percentatges de gasos alliberats.

Compost	Percentatge
CO₂	3,7 %
CO	70,5 %
H₂	1,7 %
N₂	19,9 %
C	4,2 %

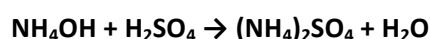
6.2.2 Producció de fertilitzants.

Potser una de les aplicacions més importants a nivell mundial de l'amoníac, i per extensió de l'hidrogen, és la síntesi industrial de fertilitzants que continguin nitrogen. Quasi el 85% de l'amoníac que es produeix en el món és utilitzat per la producció de fertilitzants.

En el món de l'agricultura és imprescindible l'ús de fertilitzants per donar els nutrients bàsics a les plantacions per tal que es desenvolupin més ràpid i que sigui més productiu. Un d'aquests nutrients essencials que utilitzen les plantes és el nitrogen, i aquest s'obté a través de compostos que són rics en aquest element, com veurem més endavant. No cal dir que l'agricultura és la que subministra aliments vegetals i productes primaris a tot el món. Sense fertilitzants no hi hauria agricultura moderna, i sense agricultura no hi hauria subministrament d'aliments.

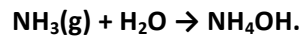
Els compostos que formen el nitrogen com a fertilitzants, són del grup dels fertilitzants minerals; és a dir, que són inorgànics. D'aquests hi ha dos tipus que els podem dividir segons el mètode d'obtenció: a través de mines o a partir de la síntesi química de l'amoníac.

D'aquests fertilitzants, els primers inorgànics no van ser utilitzats fins a la meitat del segle XIX, ja que abans només s'utilitzava la femta dels animals o peix mort (usats fins al segle XX). Però el primer fertilitzant mineral de "síntesi química" va ser el sulfat d'amoní o $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, que s'obtenia segons la següent reacció:



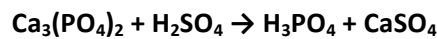
L'àcid sulfúric que provenia del SO_2 , s'obtenia a partir del sofre de les mines, que un cop cremat i mesclat amb el vapor d'aigua produïa H_2SO_4 . Per la seva part l'amoní provenia de les

mines de carbó. Aquestes s'inundaven amb aigua per obtenir l'hidròxid d'amoni seguint la reacció:



Més tard es va començar a aspirar amoníac gasós de la mina i a mesclar-lo amb aigua a l'exterior. Posteriorment es trobaren mines de NaNO_3 (nitrat de sodi) a Xile, transformant-se així en el segon fertilitzant mineral més utilitzat.

També en les mines, s'obtenien altres fertilitzants minerals basats en altres nutrients inorgànics que utilitzen les plantes, com per exemple el fòsfor (P), que va ser el següent fertilitzant mineral. Encara que el fòsfor en la natura no es troba aïllat, es feien servir compostos que es trobaven a les mines calcàries. En aquestes mines el fòsfor es trobava en forma de fosfat de calci [$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$], però aquest compost és molt difícil d'assimilar per les plantes, per tant el fosfat de calci es fa reaccionar amb àcid sulfúric per a que doni àcid fosfòric, un compost molt més assimilable per les plantes.

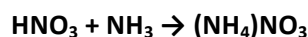


Tenim moltes altres formes fosfatades que s'obtenen a partir del àcid fosfòric.

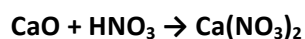
Un altre compost essencial que podem destacar és el potassi (K) que va ser trobat en mines Austríiques en forma de KCl (clorur de potassi).

Però el gran salt dels fertilitzants es va produir durant la 1a Guerra Mundial, on, com hem dit abans, Fritz Haber va trobar la manera de sintetitzar amoníac industrialment. A partir de llavors la majoria dels fertilitzants es basarien en el nitrogen, ja que tenien la font d'aquests assegurada.

A partir de la combinació del procés Haber i el Procés Ostwald, en la primera dècada del segle XX, van sorgir una sèrie de nous fertilitzants minerals basats en el nitrogen. Per exemple, un dels primers va ser el nitrat d'amoni $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$, que gràcies a la seva quantitat de nitrogen va resultar molt útil. S'aconseguia segons la següent reacció.

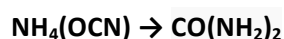


Un altre fertilitzant que va sorgir a principis de segle va ser el nitrat de calci $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, on el major país productor d'aquest fou Noruega. També s'obtenia a partir de la següent reacció:



També es sintetitzava nitrat de sodi (NaNO_3) que encara que no fos tan eficaç com els altres fertilitzants es seguia utilitzant per tradició.

Però aleshores, al 1930 va aparèixer la urea que té la fórmula empírica $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. Es sintetitza mitjançant la síntesi de Wöhler; i va ser el primer compost orgànic que va ser sintetitzat a partir d'un compost inorgànic. Una manera d'obtenir-lo és a partir de cianat d'amoni (NH_4OCN) mesclat amb aigua. Aquesta mescla es calenta i es "transposa" per formar urea:



Actualment és el fertilitzant més utilitzat en el món ja que presenta alguns avantatges respecte a altres fertilitzants. El 91% de la urea produïda s'utilitza com a fertilitzant, i té l'avantatge d'un alt contingut en nitrogen, que com hem dit en repetits cops és essencial pel creixement de la planta. Un altre avantatge de la urea és la seva adaptabilitat a diferents tipus de vegetals, facilitant així el seu treball com a fertilitzant.

Que tots els fertilitzants després de la guerra mundial siguin amoníacs, nitrats, urea o amoníacs, no és una casualitat. A part de que es portés a terme el Procés Haber de manera industrial, durant la guerra s'havien construït moltes fàbriques per a la producció d'explosius com l'àcid nítric o el nitrat d'amoni. A l'acabar la guerra totes aquestes fàbriques, que un dia van servir com a productores d'explosius ara es convertien en indústries fabricants de fertilitzants minerals que utilitzaven els nitrats com a base del sistema de producció.

Finalment, podem concloure que avui en dia els nitrats són els fertilitzants més utilitzats, ja que tenim un sistema de producció d'amoníac molt rendible que ens permet sintetitzar grans quantitats d'aquest producte i per defecte transformar-lo en fertilitzants minerals. Hem de recalcar una vegada més la importància d'aquests fertilitzants en el món agrícola i de l'alimentació, ja que si no fos per ells molts processos agrícoles es veurien repercutits afectant així a la producció d'aliments. Això provocaria una gran crisi alimentària en el món que deixaria a la gran majoria de la població sense els suficients aliments per subsistir. Per tant, l'amoníac i els fertilitzants tenen un gran impacte en el dia a dia de la nostra societat.

6.2.3 Altres usos de l'amoníac

Tots els usos del amoníac que hem explicat anteriorment es refereixen a una producció més industrial i a gran escala, però sembla ser que els usos que més coneixem i trobem més comuns, no són pas els industrials, sinó els domèstics que utilitzem dia a dia. D'aquests usos domèstics del amoníac se'n poden destacar dos: l'ús com a producte de neteja i com a dissolvent de tints i tintures.

Començarem explicant un dels usos més coneguts i generalitzats de l'amoníac com a producte de neteja de la llar. Potser l'amoníac és un dels netejadors més utilitzats en el món, això es deu, en gran part, al seu gran poder desengreixador sobre la brutícia difícil. Es pot utilitzar tant per rajoles, vidres, teixits... fins i tot es pot utilitzar com a dissolvent de certs tipus de pintures i vernissos. Però, com actua l'amoníac? L'amoníac fa dues funcions molt importants: redueix la duresa de l'aigua i produeix la saponificació dels lípids. La saponificació és una reacció que es produeix entre qualsevol lípid i una mescla altament alcalina, com pot ser la de l'aigua amb l'amoníac. Aquí es presenten les dues reaccions aproximades de la dissociació de l'amoníac en aigua i de la conseqüent saponificació.



Àcid Gras + Base Dèbil → Sabó + Glicerina

La majoria dels amoníacs de venda al públic són d'entre 5-7% en volum. Encara així, l'olor natural del amoníac, que és molt desagradable, pot resultar perillosa i les empreses productores el perfumen per tal que no resulti molt tòxic per inhalació. Tot i així, un dels riscos principals de l'amoníac com a producte de neteja és la intoxicació per inhalació, ja que al ser gas el seu estat a temperatura ambient, poc a poc el líquid va desprenent amoníac gasos. La

seva inhalació pot ocasionar irritació d'ulls i gola, mal a les vies respiratòries i inflamació dels pulmons, a més de cefalees i un augment en la tensió sanguínia. En grans quantitats, més de 5.000 ppm (parts per milió) en l'ambient, pot derivar en un edema pulmonar, i fins i tot, la mort. D'altra banda, el contacte de l'amoníac amb la pell pot causar irritació, cremades i butllofes si la concentració en l'ambient és més gran que 300 ppm. La seva ingestió resulta poc probable, els seus efectes també són nocius: la destrucció de la mucosa gàstrica. Això implicaria múltiples problemes digestius, amb resultats fatals. Per tant, encara que sigui un producte de neteja molt típic, se n'ha de saber fer una utilització correcta per tal que no hi hagi conseqüències fatals.

I per finalitzar, l'amoníac també pot ser utilitzat com a dissolvent de tints i tintures. Tant sigui per a tintures de teixits, com per tints capil·lars o productes d'estètica. En aquests últims, va resultar una gran innovació ja que va revolucionar la manera de tenyir el cabell. Des que el fundador de l'actual casa L'Oréal (Eugène Schueller) va crear la primera tintura comercial del cabell a partir de l'amoníac, aquest proporciona uns grans avantatges a l'hora de fixar el color i ajuden a una "tintura permanent". Igualment segueixen existint tots els inconvenients abans esmentats i que s'han de tenir en compte a l'hora d'utilitzar un amoníac, encara que estigui molt diluït.

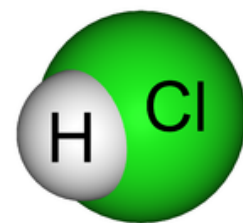
6.3 Síntesi d'àcid clorhídric

Quan parlem d'àcid clorhídric estem parlant d'un dels àcids més coneguts i amb un dels PH més baixos de tots els àcids inorgànics. Encara que es pot obtenir a partir de diversos processos relacionats amb l'àcid sulfúric, un mètode d'obtenció bastant comú és el contacte directe entre els dos gasos implicats en la molècula: l'hidrogen i el clor. Però abans parlem una mica de les seves propietats atòmiques i químiques.

6.3.1 Estructura i Característiques.

L'àcid clorhídric és una dissolució aquosa del gas clorur d'hidrogen (HCl). És molt corrosiu i àcid. Es tracta d'un àcid fort que es dissocia completament en dissolució aquosa. Una dissolució concentrada d'àcid clorhídric té un pH inferior a 1, una dissolució de HCl 0,1 M dona un pH de 1. Amb 40 ml és suficient per matar un ésser humà, en un litre d'aigua. En disminuir el pH provoca la mort de tota la flora i fauna del sistema digestiu.

A temperatura ambient, el clorur d'hidrogen és un gas lleugerament groc, corrosiu, que no és inflamable, més pesat que l'aire, d'olor molt irritant. Quan s'exposa a l'aire, el clorur d'hidrogen forma vapors corrosius densos de color blanc. Presenta una estructura com a la figura 1.1, es tracta d'un hidrur molecular i per tant entre el clor i l'hidrogen hi haurà un enllaç covalent on compartiran un electró.



6.3.2 Síntesi d'àcid clorhídric.

Actualment tenim tres mètodes per produir àcid clorhídric industrialment: dos no impliquen directament l'hidrogen però la tercera sí.

Procés de sal i àcid sulfúric.

Es fa reaccionar clorur de sodi amb àcid sulfúric per formar clorur d'hidrogen i bisulfit de sodi (NaSCl_2) a temperatures de 150°C ; aquests mateixos reactius a temperatures de 1.000°C

generen sulfat de sodi (Na_2SO_4). Les reaccions que impliquen la producció de l'àcid són endotèrmiques. Aquesta mateixa reacció es treballa en altres processos però tots ells inclouen l'administració de temperatura i després una recuperació del clorur d'hidrogen per absorció per produir solucions concentrades d'àcid clorhídric. A continuació tenim la reacció a 150 i 1000° C respectivament:

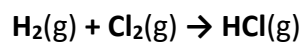


Procés Hargreaves.

Aquest procés està en desús, però s'inclou per la seva tradició. El seu abandonament es deu a la dificultat d'aconseguir àcid concentrat a partir de solucions diluïdes de gas i l'increment en la mà d'obra. Es fa reaccionar una sal, diòxid de sofre, aire i vapor d'aigua. Es generen els mateixos productes que en el procés anterior. Les reaccions són exotèrmiques i a causa d'això es genera suficient calor per mantenir la reacció del procés un cop els reactius arriben a la temperatura desitjada, la qual pot variar de 420° C a 540° C

Procés sintètic.

En aquesta forma de producció sí que intervé directament l'hidrogen com a tal. Normalment es pot sintetitzar per la combustió d'una barreja controlada de clor i hidrogen. El producte té tan alta concentració com alta puresa, per aquest procediment sense més purificació s'arriba fins a 98% de puresa i després dels tractaments de purificació a 99,7%. Les temperatures de reacció arriben als 1.200 °C sent una reacció altament exotèrmica. La reacció general és:

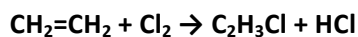


6.3.3 Aplicacions de l'àcid clorhídric

La majoria del clorur d'hidrogen produït es consumeix a la indústria química però té aplicacions difoses en neteja, desinfecció i tractament d'aigües.

Una de les més importats i potser la més útil és la producció de Clorur de Vinil ($\text{CH}_2=\text{CHCl}$) i altres hidrocarburs clorats que consumeixen grans quantitats d'àcid clorhídric. El clorur de vinil, després s'utilitza per sintetitzar moltes altres varietats de polímers com són el PVC mitjançant processos de polimerització. El clorur de vinil es sintetitza per dues vies:

- La primera és la cloració directa de l'etilè, que és espontània a temperatures més altes de 200°C, però no té massa bon rendiment perquè produeix molt dicloroetilè i àcid clorhídric. La reacció general és:



- El segon mètode es la hidrocloració de l'acetilè, aquesta ja té una conversió molt més alta (98%) i està catalitzada per clorur de mercuri (HgCl_2) i carbó activat. La reacció es dona a 150°C i es la següent:



També es consumeix per a la producció de cautxús i polímers clorats. En l'extracció de petroli, en forma aquosa, s'usa per acidificar els pous petrolífers per tal d'augmentar el flux del cru a través d'estructures de roca calcària. Es troba com additiu o component principal de molts

productes de neteja, desinfecció i per evitar la formació de dipòsits carbonatats en banys i piscines. En la indústria dels metalls s'utilitza en la refinació de minerals metàl·lics, en neteja, desincrustació àcida etc. S'utilitza també en la refinació de greixos, sabons i olis comestibles, per curtir pells de cuir, producció de fertilitzants, colorants i pigments i en l'ajust del pH de l'aigua.

7. Emmagatzematge i transport d'hidrogen.

Ja hem explicat alguns dels processos industrials més importants en els quals intervé l'hidrogen. Però al ser un gas presenta diversos problemes a l'hora d'emmagatzemar-lo i transportar-lo. Evidentment, si no és produït a la mateixa planta industrial, l'hauré de transportat fins a la planta amb alguna tècnica d'emmagatzematge. Per tant en aquest apartat analitzarem les diferents tècniques d'emmagatzematge i transport que se'ns presenten a l'hora de tractar l'hidrogen.

7.1 Emmagatzematge d'hidrogen.

Avui en dia existeixen diverses maneres d'emmagatzemar l'hidrogen, i totes elles depenen completament dels paràmetres que trobem en la següent taula:

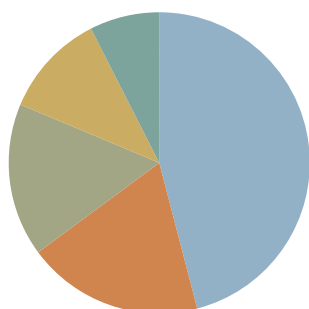
	Densitat energètica volumètrica teòrica (kWh/l) ¹	Dens.En. volumètrica del contenidor (kWh/l) ²	Fracció màssica útil de l'hidrogen (%) ³	Projecció de la FM útil de l'hidrogen (%) ⁴
H2 líquid (20K; 1bar)	2,4	1,2	6	12
H2 comprimit (300K; 700bar)	1,3	1,1	4	9
Hidrurs metàl·lics intersticials	4,2	1,8	1,5	2
Hidrurs metàl·lics complexos	4,2	0,7	5	7
Hidrurs químics	3,7	1,4	6	9

1. **Densitat energètica volumètrica teòrica:** és el poder calorífic interior de l'hidrogen respecte al seu volum o el volum material d'emmagatzematge.
2. **Densitat energètica volumètrica del contenidor:** és el poder calorífic interior de l'hidrogen respecte del volum del seu sistema d'emmagatzematge.
3. **Fracció màssica útil de l'hidrogen:** és la massa de l'hidrogen contingut en el sistema respecte a la massa total del sistema ple. Dades actuals.
4. **Projecció de la Fracció màssica útil de l'hidrogen:** és la massa de l'hidrogen contingut en el sistema respecte a la massa total del sistema ple. Projecció del 2015.

Depenent d'aquestes dades, es farà servir un sistema d'emmagatzematge o un altre.

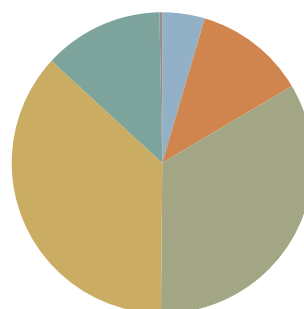
Una de les característiques de l'hidrogen que afecta al seu emmagatzematge és que conté molta energia per unitat de massa, però té molt poca per unitat de volum. Aquest fet, porta a que les investigacions actuals es centrin en la densitat volumètrica del procés d'emmagatzematge, és a dir, poder contenir el màxim volum en el mínim espai. A continuació podem veure un parell de gràfiques on es mostra una comparativa de l'energia continguda per massa i la continguda per volum de l'hidrogen, tot comparant-los amb altres tipus de fonts d'energia.

Contingut per pes (kWh/t)



■ Hidrogen ■ Gas Natural ■ Gasolina
■ Carbó Dur ■ Metanol ■ Bateries

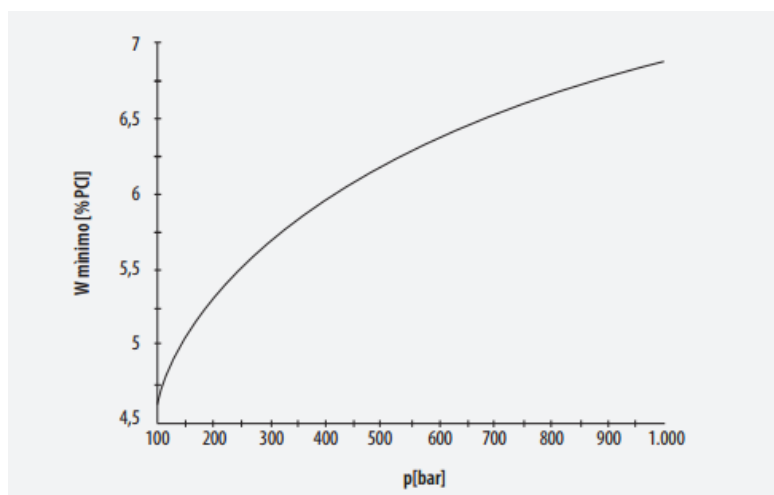
Contingut per volum (kWh/m³)



■ Hidrogen ■ Gas Natural ■ Gasolina
■ Carbó Dur ■ Metanol ■ Bateries

7.1.1 Hidrogen comprimit.

L'emmagatzematge com a gas comprimit és el més senzill, encara que les densitats energètiques són les més baixes a no ser que es facin servir altes pressions, ja que la densitat d'energia depèn de la pressió, si s'assumeix un comportament de gas ideal. Normalment, les pressions de treball oscil·len entre 200 i 700 bars, depenent del material i tecnologies utilitzades. El consum energètic d'aquest procés el dóna el treball de compressió de l'hidrogen. Podem veure una representació a la gràfica següent, que presenta la mínima energia de compressió requerida, respecte l'energia química continguda en l'hidrogen, en funció de la pressió en que es troba.



Cal destacar que aquests treballs han estat calculats per compressions isoterms i reversibles, sent així, els consums reals majors. Així que el 5,3% teòric per arribar als 200 bar es converteix en menys del 10% de l'energia química continguda en l'hidrogen. Igualment aquesta corba no creix linealment, així que en tot cas ens afavoreix treballar en altes pressions. Així que el consum mínim per 700 bar seria 6,5% , és a dir sol un 22% més que per arribar als 200 bar, havent-li incrementat la pressió 3,5 vegades. Però la realitat segueix sent diferent, així que

l'energia necessària per arribar als 700 bar és de 15% de la energia química que conté l'hidrogen, realment.

La tecnologia de compressió, ja es una tecnologia prou madura, però últimament s'està intentant passar de 200 bar a 700 bar, ja que com hem vist anteriorment és més eficient. Tenim actualment tres tipus d'instal·lacions d'hidrogen comprimit possible:

1. Les grans instal·lacions de gran volum d'emmagatzemament. Aquí l'important és el cost i no el volum o massa perquè es tracta d'instal·lacions fixes que no es desplacen. Es solen guardar en grans caveres o aqüífers a unes pressions d'aproximadament 10 bar, que suposa un cost de compressió molt petit.
2. Les petites instal·lacions estacionaries. En aquestes instal·lacions busquen una solució de compromís amb el cost i la massa. Es transporta normalment en camions fins a les instal·lacions, on es solen utilitzar botelles d'acer a 200 bar i en un volum d'entre 10 o 50 litres.
3. Les petites instal·lacions mòbils. En aquestes instal·lacions les botelles d'acer són massa pesades per tant s'han d'utilitzar altres materials (alumini, polímers, fibres...) per tal de poder emmagatzemar l'hidrogen a més pressió i que la massa total no sigui molt alta. Les pressions oscil·len entre 350 i 700 bar, en el millor dels casos.

7.1.2 Hidrogen líquid.

Una altra manera d'emmagatzemar hidrogen és en estat líquid. Però la tecnologia criogènica de l'hidrogen no està tan estesa com la de l'hidrogen comprimit. Així que sembla que aquesta tecnologia tan sols serà utilitzada de manera industrial.

Una de les dificultats d'aquest tipus d'emmagatzematge és que a 1 atm la temperatura de saturació o condensació de l'hidrogen es de 20K(-253°C). Aquesta és la màxima temperatura en la qual l'hidrogen es manté en estat líquid. Per tant tenim dos problemes: arribar a aquesta temperatura i mantenir-la.

Encara que l'energia necessària per poder condensar l'hidrogen a condicions ambient tan sols representa un 3,2% de l'energia química continguda en l'hidrogen, no es un procés viable. Es necessitaria un focus tèrmic que reduís la temperatura fins a 20K, pel qual seria precís un sistema frigorífic que funcionés com a mínim a 223/20 kWh d'energia per cada kWh de fred produït. Així que en el millor dels casos consumiria un 44% de l'energia continguda en l'hidrogen.

Per tant hem de buscar altres mètodes de refrigeració. Una manera de fer-ho és a través del procés Linde, que consisteix en subministrar hidrogen gasós a baixa temperatura (183K), que ha estat prèviament refrigerat, per exemple, a partir de nitrogen líquid (77K), per tal de ser transformat en líquid. Aquest procés pot ser adaptat a altres mètodes, però generalment sol requerir un 33% de l'energia química de l'hidrogen.

L'altre inconvenient o problema és la necessitat de mantenir la temperatura a 20K, això s'aconsegueix de manera similar al gas natural: recorrent a cambres de buit en les parets. El consum energètic demandat per aquest sistema es xifra entre l'1 i el 2% de l'energia emmagatzemada. També existeix un sistema que s'anomena "crio-compressió" que amb una certa pressió i unes temperatures del voltant dels 77K, aconseguix reduir considerablement les pèrdues per evaporació i l'energia consumida.

7.1.3 Hidrurs metàl·lics.

Finalment trobem els hidrurs metàl·lics, que com hem explicat anteriorment, són combinacions de l'hidrogen amb metalls o actínids. Aquesta combinació no és estequiomètrica així que el nombre d'elements de cada hidrur estable sol variar. Hi ha dos processos essencials durant l'emmagatzematge d'hidrogen en els hidrurs: la càrrega o adsorció de l'hidrogen i la descàrrega o desorció de l'hidrogen. La primera fase d'adsorció necessita produir-se a baixes temperatures per que es carregui d'hidrogen. En canvi la desorció es duu a terme en altes temperatures per tal de separar l'hidrogen. Es parla d'hidrurs d'alta temperatura quan la desorció es realitza entre 150 i 300 °C, per contra, en els hidrurs de baixa temperatura la desorció es realitza entre 20 i 90 °C. En quant a les pressions, l'adsorció es fa entre 30 i 55 bar i la desorció entre 0,7 i 10 bar.

A continuació, i com podem veure en la següent taula, tenim les famílies d'hidrurs més comuns que es solen utilitzar per emmagatzemar hidrogen:

Compost intermetàl·lic	Hidrurs
AB ₅	LaNi ₅ H ₆
AB ₂	ZrV ₂ H _{5,5}
AB ₃	CeNi ₃ H ₄
A ₂ B ₇	Y ₂ Ni ₇ H ₃
A ₆ B ₂₃	Ho ₆ Fe ₂₃ H ₁₂
AB	TiFeH ₂
A ₂ B	Mg ₂ NiH ₄

L'element A sol ser o una terra rara (actínids o lantànids) o un metall alcalí i tendeix a formar un hidrur estable. L'element B sol ser un metall de transició, on aquí l'hidrur es més inestable. El níquel se sol utilitzar com a element B per les seves propietats catalítiques per a la dissociació d'hidrogen. La família AB₅ presenta un comportament molt favorable a temperatura ambient, però el seu contingut en hidrogen és molt baix (2%). Però per una altra part, els hidrurs basats en Mg i Ni₂Mg tenen una bona capacitat d'emmagatzemament d'hidrogen (7%), però resulten ser molt lents en el seu procés de desorció, fins i tot després de l'activació a 400 °C.

Malgrat tenir alguns inconvenients, els hidrurs metàl·lics tenen una densitat volumètrica de l'emmagatzematge que arriba a ser el doble de la densitat en hidrogen líquid, si bé a temperatura ambient la densitat en pes està per sota del 2%.

7.2 Transport d'hidrogen

Una vegada ja tenim l'hidrogen emmagatzemat, hem de pensar si és necessari transportar-lo. Això sempre dependrà del receptor final del producte. Actualment, la demanda d'hidrogen és purament industrial, així que el transport es realitza de dues formes: per carretera, amb botelles pressuritzades; o amb ferrocarril o vaixell amb botelles pressuritzades o de manera criogènica.

Es preveu, però, que si en un futur proper es comença a generalitzar el consum d'hidrogen, seria factible el transport massiu per mitja de canals, tipus gas natural. Tot i així, existeixen, des de fa uns anys un nombre limitat de "hidrogenoconductes" en diversos països (USA,

Alemanya...), on viatja un percentatge en hidrogen (5-30%) mesclat amb el gas natural. També cal esmentar que la construcció de conductes per transportar de manera massiva l'hidrogen no suposaria un gran cost econòmic ni tècnic.

Es poden preveure diferents tipus de transport per l'hidrogen, depenent sobretot, de les seves aplicacions posteriors:

- Hidrogeneres amb servei d'hidrogen pressuritzat. A nivell de transport per carretera estarien dedicades a vehicles privats i autobusos urbans, així com a camions i furgonetes. Totes les aplicacions es donarien a gran escala en els mercats massius. També s'aplicaria a transport ferroviari i a transport marítim.
- Hidrogeneres amb servei d'hidrogen líquid. Seria subministrat a curt termini a motocicletes a partir d'hidrogen en cartutxos.
- Hidrogen canalitzat. Es dedicaria a instal·lacions estacionaries, ja fossin industrials (fàbriques) o vivendes privades amb piles de combustible de menys de 200 kW.
- Subministrament en ampolles a pressió. Destinada a aviació i vehicles de gran ús (taxis etc.). també en aquest format es subministrarien en aplicacions portàtils com a substitut de les bateries.

Dins dels que necessiten transport d'hidrogen hi trobem tres grups d'interès: els usuaris finals, el gestor de l'estació i l'empresa energètica comercialitzadora d'hidrogen.

Els aspectes més importants que demanen els usuaris finals són: la seguretat, el temps de proveïment, el cost i la disponibilitat, tenint molta més importància la primera. Si bé es porta utilitzant l'hidrogen en la indústria durant molts anys ja, l'ús per personal no professional és una innovació. Això va a implicar un disseny dels sortidors de maneig molt senzill i a prova de fuites o errors. El fet de que no hi hagi suficient disponibilitat de sortidors o que hi hagi un sobre cost en la instal·lació d'aquests, són termes econòmics que poden solucionar-se amb el pas del temps. Finalment, la velocitat de proveïment és un problema que vindrà condicionat en funció de quin tipus d'emmagatzemament d'hidrogen s'imposi: comprimit, líquid o en hidrurs metàl·lics.

Els gestors de les estacions de servei tenen prioritats semblants. En aquest cas existiran dos tipus d'instal·lacions diferents, les que tinguin producció en el mateix lloc de tractament i les que es proveïxin d'hidrogen produït fora de la planta de tractament. Per a tots dos la seguretat, no només del client, sinó del seu personal i de tota la instal·lació, és una prioritat, i perquè aquesta seguretat no provoqui un encariment de les instal·lacions de forma desmesurada, és important el desenvolupament d'estàndards. La velocitat de proveïment, que permeti una major utilització de les instal·lacions és també un paràmetre en el qual s'ha de posar especial interès, encara que no és el que condiciona totalment el procés. El que ho serà, en aquest cas, és l'econòmic, que engloba tant la inversió inicial, els costos de manteniment dels equips i el cost de personal.

Finalment, els requisits de les empreses energètiques estan ben definits: uns costos mínims de transport. Això implica que aquestes empreses són les més interessades a buscar el millor sistema de subministrament, probablement sigui una barreja de solucions entre transport per carretera, per canonada i producció en el mateix lloc de tractament de l'hidrogen.

7.2.1 Hidrogen i seguretat

Per tal que l'hidrogen es pugui incloure en la vida diària de les persones com també passa amb el transport i emmagatzematge, s'han de tenir en compte les seves característiques físiques. Aquestes presenten certs avantatges i inconvenients respecte a altres combustibles.

L'ús d'hidrogen com a combustible presenta diversos avantatges. El primer té a veure a que és un gas molt poc dens i extremadament volàtil, el que provoca que es difongui cap a dalt, un gran avantatge quan es treballen en espais oberts. A més l'hidrogen no és tòxic per als humans, per tant no hi ha cap risc d'intoxicació. La seva baixa densitat energètica per unitat de volum, que és un inconvenient a l'hora d'emmagatzemar-lo, resulta un avantatge a l'hora de que allibera menys energia per unitat de massa que altres combustibles, en cas d'una combustió accidental. L'hidrogen difícilment detona espontàniament, per tant és poc probable que es produeixi una combustió a concentracions pobres.

Els inconvenients de l'hidrogen com a combustible es resumeixen en dos: la seva alta densitat energètica per unitat de massa, un avantatge en qüestions energètiques, que és un inconvenient en aspectes de seguretat. I l'altre inconvenient és el perill que resulta de tenir grans concentracions d'hidrogen en espais tancats. Això es deu a les següents qüestions:

- L'hidrogen té una energia d'activació molt baixa respecte altres combustibles. A primera vista podria resultar un avantatge en aspectes de combustió i piles de combustible, però en aspectes de seguretat, una sola espurna pot combustionar violentament l'hidrogen.
- La seva baixa temperatura per transformar-lo en líquid complica no només funcionalment l'emmagatzematge i ús de l'hidrogen líquid, sinó també la seguretat associada.
- Degut a la petita mida de la molècula resulta ser molt fugable, per tant és de molta importància que les empreses productores assegurin correctament el contenidor on es trobin.
- El fet que l'hidrogen sigui incolor i inodor en el seu estat natural, dificulta la identificació d'una fuga.

Per tant l'hidrogen en altes concentracions resulta ser perillós, un element que s'ha de tractar amb compte. Per tant hem d'indicar algunes mesures de seguretat a l'hora de manipular-lo.

- Assegurar l'extracció d'hidrogen, fent-ho des de dalt per evitar que es centri i propiciar que es ventili.
- Les botelles d'hidrogen s'han d'ubicar preferiblement fora dels edificis.
- Utilització d'equips i materials que no produeixin cap tipus d'espurna o flama.
- Instal·lar detectors d'hidrogen que ens avisin quan la concentració sigui elevada.

Bomba H i desastre de Hindenburg.

Cal destacar que no hi ha hagut cap accident relacionat amb l'hidrogen des de ja fa 100 anys, això es deu a que des dels seus inicis s'ha desenvolupat una gran tecnologia al voltant de la seguretat a l'hora de manipular-lo. Encara així el públic general i fins i tot algunes persones de la comunitat científica tendeixen a pensar en l'hidrogen com un element perillós. Aquesta creença es deu en part a dues raons: la bomba H i el desastre de

Hindenburg. Aquestes dues “falses” creences de que l'hidrogen està relacionat amb els dots fets, fa que l'avenç en la tecnologia sigui una mica més lent.

Primerament cal aclarir que l'hidrogen no té res a veure amb la bomba H o termonuclear, ja que encara que s'utilitzi hidrogen com ha font d'alimentació de la bomba, són àtoms de deuteri (^2H) i triti (^3H), sintetitzats i concentrats en la bomba els que duen a terme la reacció en cadena que és la que causa la gran explosió de la bomba H. Per tant l'hidrogen H_2 del que parlem, no té res a veure amb l'hidrogen, sinó en una invenció feta per la mà humana, amb l'única intenció de provocar el més dany possible. A més no es tracta sols de d'un procés de fusió dels nuclis de deuteri i triti, sinó que anteriorment hi ha una reacció de fissió (isòtops de l'urani) la que desencadena la fusió posterior. Demostrant així que no es l'hidrogen el que acciona la bomba.

Per una altra banda tenim potser el fet que va frenar més el desenvolupament de la tecnologia de l'hidrogen: el desastre de Hindenburg (1937). Els primers zepelins es sustentaven en l'aire per mitjà d'hidrogen gasós, per tant, el fet de que s'incendiés i s'estampés contra el terra, provocant centenars de morts, va ser atribuït a l'hidrogen. Aquesta acusació, va fer que les investigacions als països afectats (USA i Alemanya), que són líders tecnològics, s'endarrerissin. No va ser fins més tard, 1999, quan es va concloure que l'hidrogen no va ser el causant de l'accident, sinó que va ser per causa de la inflamabilitat de la lona que recobria el dirigible. L'hidrogen que es va escapar ràpidament cap dalt, no va ser causant de cap mort en el Hindenburg.

Com a curiositat sobre el cotxe d'hidrogen, un estudi realitzat per Michael Swain a la Universitat de Miami fa uns anys, va demostrar la seguretat d'un vehicle d'hidrogen. A partir d'un cotxe d'hidrogen i un de similar de gasolina, va produir danys equivalents als dipòsits i va forçar la combustió. El cotxe d'hidrogen va patir danys lleus (sense perill per als possibles ocupants), mentre que el de gasolina va quedar totalment destrossat.

Per tant queda demostrat que, encara que tingui els seus inconvenients, les pors i mites infundats sobre l'hidrogen no són certs. Poden assegurar-nos així un bon futur per aquest element i les seves formes d'emmagatzematge i transport.

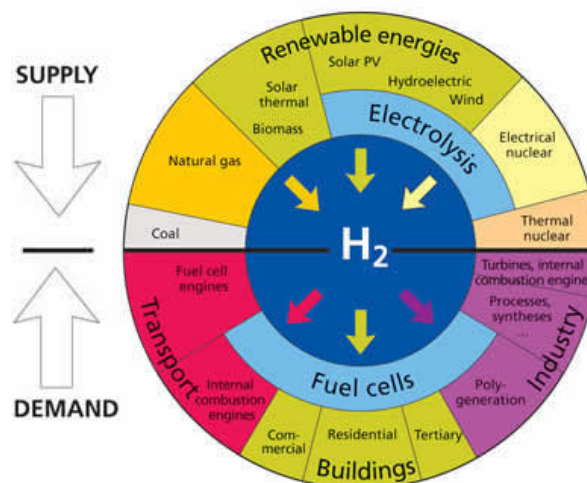
8. Hidrogen, una oportunitat de futur sostenible.

L'hidrogen, com ja hem vist, pot ser utilitzat per la pila de combustible per tal de produir energia elèctrica i altres. Aquesta pila i el seu combustible més important, l'hidrogen, aconseguirien una forma d'energia neta i que reduiria les emissions de diòxid de carboni que tant desestabilitzen el clima del planeta. La pila d'hidrogen és llavors la clau d'una nova economia que hem d'utilitzar per tal que el món sigui més sostenible: l'economia de l'hidrogen.

8.1 L'economia de l'hidrogen.

L'economia de l'hidrogen, com el seu nom indica, és una sistema econòmic i energètic que té com element central la molècula d'hidrogen. Va ser esmentada per primera vegada al llibre homònim de Jeremy Rifkin l'any 2002, i a partir de llavors l'opció d'una societat que no funcionés amb combustibles fòssils ha estat molt debatuda.

L'economia de l'hidrogen es basa en una qüestió molt simple, la substitució completa de tots els aparells que requereixin de combustibles fòssils per hidrogen. Com podem veure en l'esquema inferior tota demanda ha de passar per l'hidrogen i per extensió a les piles de combustible per tal de satisfer-la.



Evidentment aquest innovador sistema econòmic no queda sense detractors, que critiquen alguns punts de l'economia de l'hidrogen que encara estan una mica fluixos a l'hora de tecnologia i investigacions científiques.

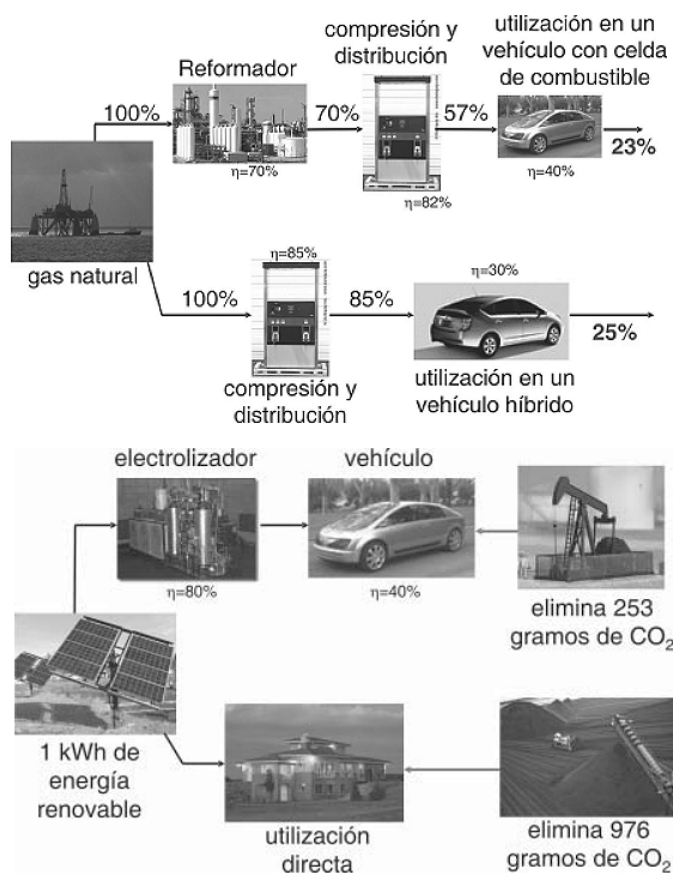
8.1.1 Critiques a l'economia de l'hidrogen

Com hem dit, l'economia de l'hidrogen no es queda sense detractors. Evidentment el sistema no és perfecte, però a continuació exposarem les crítiques a l'economia de l'hidrogen, no sense buscar-hi una solució. Algunes són més immediates, altres requeriran més temps; això ho definirà la investigació científica que hi ha darrera de l'hidrogen.

Eficiència de l'hidrogen.

Les crítiques en aquest sector estan enfocades als costos de producció d'hidrogen i la seva eficiència a l'hora d'utilitzar-lo com a combustible. Realment es sap que la utilització directa del gas natural en cotxes és més eficient que tot el procés de transformar aquests gas en hidrogen i després utilitzar-lo en el cotxe.

Un altre exemple que és utilitzat, és que si una indústria utilitza un reductor de CO₂ alliberat en l'atmosfera la contaminació total alliberada és menor que si utilitzem l'energia directament, que si després la passéssim a hidrogen i l'utilitzéssim. Podem veure uns diagrames de rendiment a continuació:



Però el problema d'aquests càlculs és que són molt limitats ja que no examinen relacions simbiòtiques com l'emmagatzematge d'energia, l'eficàcia de captura i l'emmagatzematge geològic del CO₂, la cogeneració d'energia i calor o les variacions temporals tan en l'ús com en el subministrament d'energia. Així que, en resum la eficiència no s'ha d'agafar com un paràmetre decisiu ja que no és exacte i s'han de prendre també d'altres per elegir la font d'energia que s'utilitzarà (seguretat, impacte mediambiental...).

Preu de l'hidrogen.

Òbviament un factor que s'ha de tenir en compte a l'hora de veure si un sistema econòmic funcionarà és la seva viabilitat econòmica. Al no tractar-se d'una font directa d'energia,

l'hidrogen, per força costarà més que la font d'energia de la que s'ha obtingut. Per tant l'hidrogen, a hores d'ara és molt més car que els altres combustibles disponibles en el mercat. Però els combustibles fòssils tenen un problema, encara que tinguin preus competitius, són limitats i per tant, quan comencin a escassejar aleshores, necessitarem una alternativa, ja que començaran a encarir-se quan la demanda superi l'oferta. Per tant, a hores d'ara on trobem un inconvenient de preu en l'hidrogen, en un futur on pugui competir amb altres combustibles, llavors podrà ser una solució factible a la crisi de combustible.

Potser el cost econòmic de l'hidrogen és més alt que altres combustibles, però també hem de tenir en compte el seu cost mediambiental i la seva eficiència. Per un costat l'hidrogen es mou en un sistema tancat, com podem veure en la següent figura, i tan sols produeix aigua, oxigen i hidrogen (si utilitzem energies renovables), a diferència dels combustibles fòssils que tenen un cost mediambiental molt més elevat, ja que produeix diòxid de carboni que afecta a l'atmosfera.



Per l'altra part, i com ja hem dit anteriorment, l'hidrogen té una alta eficiència respecte als combustibles fòssils, i això presenta un enorme avantatge respecte aquests. A més de ser més descentralitzat, menys vulnerable i menys sorollós que alguns sistemes actuals. Esmentar també la gran flexibilitat que tenen les piles d'hidrogen a l'hora de subministrar energia a dispositius ben variats.

Per tant encara que ara resulti car, amb el fi de l'era dels combustibles fòssils l'hidrogen serà més competitiu en el mercat dels combustibles.

Implementació de l'hidrogen.

L'última de les crítiques a l'hidrogen es basa simplement en el temps d'implementació que tindria el sistema de l'economia de l'hidrogen. Evidentment, d'un dia per l'altre no es pot implementar un nou sistema econòmic i energètic totalment diferent a l'actual, sinó que s'ha de tractar d'un canvi progressiu.

La principal necessitat per implementar l'economia de l'hidrogen és reduir el nombre d'emissions nocives de diòxid de carboni a l'atmosfera. Evidentment, la tecnologia de l'hidrogen no té la maduresa necessària per ser implementada actualment. Però en un futur no molt llunyà, es necessitarà d'un recurs energètic que no danyi l'atmosfera i que estabilitzi, per tant el clima global. El temps requerit mínim per implementar l'economia de l'hidrogen

(cotxes i cases amb piles de combustible etc.) és de 50 anys aproximadament, per tant s'ha de començar immediatament si volguéssim la completa implementació per a mitjans del segle XXI. Per una altra banda quan ja estiguem durant el període de temps estimat on s'implementarà l'hidrogen, la tecnologia que envoltarà aquest, el més segur és que ja hagi madurat prou per tal de poder competir i sobrepassar els altres sistemes energètics.

8.1.2 Implementació de l'economia de l'hidrogen.

Com ja hem dit en els pròxims 50 anys és ben segur que es començarà a implementar l'economia de l'hidrogen però les característiques d'aquest sempre dependran de molts factors. A continuació resumirem quatre que es basen en àmbits diferents de producció, utilització, emmagatzematge etc.

Producció d'hidrogen nuclear a gran escala

Aquest mètode va ser ideat als anys 70, quan es plantejava construir moltes plantes nuclears, de petroli o de gas natural, degut al seu baix cost. Es basava simplement en la producció d'hidrogen a través de l'energia nuclear. Es plantejaven també transportar l'hidrogen en gasoductes els quals alimentarien els destinataris finals.

Però en els últims trenta i quaranta anys la visió i l'acceptació pública de l'energia nuclear ha canviat, encara que s'està treballant en centrals nuclears que es refredessin amb gasos que poguessin produir hidrogen líquid a través d'electròlisi i processos termodinàmics.

L'avantatge és que les centrals nuclears no produeixen CO₂, però les noves energies renovables tampoc i, per exemple, l'eòlica i la solar han demostrat tenir un molt bon rendiment en aquests tipus de processos.

Producció d'hidrogen a partir de combustibles fòssils amb captura de CO₂

És difícil imaginar l'economia de l'hidrogen basada en combustibles fòssils, però aquesta podria convertir-se en la preferida si s'aconsegueix implementar la captura i emmagatzemament geològic del CO₂.

Aquest sistema és molt semblant a l'anterior, ja que també implementaria l'ús de gasoductes a l'hora de transportar l'hidrogen. Cal comprovar si l'hidrogen ens resultaria més útil, és a dir més rendible, transformat en electricitat o transportant-lo directament al consumidor final en gasoductes. Però la tecnologia que definirà l'èxit d'aquest sistema és la captura geològica del diòxid de carboni, que limitaria molt les emissions d'aquests gas a l'atmosfera.

Hidrogen a partir de gas natural a petita escala.

Aquest sistema és molt interessant ja que no necessitaria noves infraestructures, sinó que utilitzaria les que ja estan construïdes, però per fer altres processos. Aquests es basen simplement en substituir el procés de combustió del metà (gas natural) pel seu reformat, un procés que encara que sigui més complex, és molt més eficient i produeix menys CO₂. A més la calor sobrant es podria utilitzar en la cogeneració. Addicionalment es necessitarien piles i reformadors d'alts rendiments (75%) per a que el sistema resultés viable econòmicament i mediambientalment.

L'èxit d'aquests sistemes, seria però, tan sols temporal; ja que el gas natural té un límit i per tant s'esgota. Aquesta limitació fa pensar que aquest sistema podria ser utilitzat com a transició dels combustibles fòssils a l'hidrogen.

Hidrogen a partir d'energies renovables a petita escala

Aquests sistema també va ser ideat als anys 70, però últimament s'està convertint en una opció real, degut enormement a la reducció dels costos de les energies renovables.

Aquest sistema es basa en el fet de que l'hidrogen és molt més fàcil d'emmagatzemar que l'energia elèctrica residual que produeixen. Per tant, quan els nivells d'energia eòlica o solar són alts, aquest excés es pot utilitzar per tal de produir l'hidrogen mitjançant l'electròlisi pel seu ús com a combustible o altres funcions. Per exemple, els dies que no es puguin utilitzar les vies eòliques o solars, per les raons que siguin, aleshores tindrem una reserva energètica en forma d'hidrogen per utilitzar-la quan la necessitem. Aquest és el procés invers a l'anterior, que utilitza gas natural, per produir hidrogen i aleshores energia, en lloc de consumir energia per tal de produir l'hidrogen en aquest cas.

El repte més gran a superar d'aquest sistema és el cost general de tot el procés. Aquest s'ha de sincronitzar amb el cost d'emmagatzematge, transport, destinatari final, consum (per dia, setmana, més...) i altres. Per tant hem de sincronitzar tots els costos per a minimitzar-los i que el sistema sigui factible en un futur proper. Però això, com sempre, es soluciona a través de la investigació en les noves tecnologies i en noves tècniques desenvolupades al voltant de l'hidrogen.

9. Conclusions

L'hidrogen ha resultat ser un tema fascinant i al mateix temps més complex del que esperava. Durant el procés de recerca de la informació un tema anava portant a altres i aquests, a molts més; així que en un moment determinat havia de decidir acotar la recerca. Per aquest motiu, he obviat alguns temes interessants i altres els he sintetitzat. Temes com la hidrogenació catalítica dels greixos, la refinació de petroli amb hidrogen o altres processos industrials que utilitzin aquest com a font primària, podrien formar part de un futur treball d'investigació.

Un cop finalitzat el treball i pel que fa als fonaments teòrics, encara que no hi hagués un objectiu clarificat sobre aquesta secció, he descobert molts aspectes que abans ignorava. L'enorme quantitat d'elements que forma l'hidrogen, la seva presència a l'univers, les seves característiques... han estat punts molt interessants de treballar i investigar.

Ha estat el mar pràctic el que ha donat resposta als dos objectius plantejats inicialment. A la qüestió de si l'hidrogen, actualment, té alguna aplicació útil per a les persones, podem respondre amb un rotund sí. L'hidrogen ha resultat el principal element primari per a molts i importants processos industrials, tal com el procés Haber-Bosch amb la que es sintetitza l'amoníac, un element clau per molts processos que es duen a terme a la terra. Sense aquest important element l'agricultura moderna no s'hagués pogut desenvolupar. També podem destacar la producció d'àcid clorhídric o l'hidrocracking; sense el primer no podríem sintetitzar polímers de plàstic (PVC) i sense el segon no podríem refinar compostos tals com el petroli, per a que resultin després més útils. Es pot demostrar llavors, que l'hidrogen, actualment, és molt important per processos industrials que ens ajuden a fer el nostre dia a dia més simple.

El segon objectiu que hem vaig plantejar a l'iniciar el treball no està tan clar, però. A la qüestió de si un món sense combustibles fòssils és possible; una resposta afirmativa és totalment factible, ja que a part de l'hidrogen, tenim altres mètodes per tal de substituir els combustibles fòssils; tals com l'energia solar, eòlica etc. Però el problema sorgeix quan hem plantejo si l'hidrogen podria ser un substitut factible d'aquests? Aleshores sorgeix el dubte.

Al llarg del treball, he descobert noves maneres de produir electricitat i més eficients que les d'avui en dia. Gràcies a les piles de combustible tenim una alternativa als motors i generadors actuals d'electricitat. Però m'he adonat de que encara hi ha alguns problemes tècnics a l'hora de poder implementar un sistema energètic i econòmic basat en l'hidrogen. Tenim avantatges, però també inconvenients; tals com el transport, l'emmagatzematge, la producció de l'hidrogen etc. Per a que la pila de combustible sigui viable com a font d'electricitat i energia s'han de minimitzar aquests inconvenients. Però també he pogut observar que realment hi ha una part de la comunitat científica que dóna suport i investiga en el camp de l'hidrogen per tal de millorar i eliminar tots els problemes que comporti la utilització d'aquests element en la vida diària.

Però aquest desenvolupament de les energies renovables i de l'economia de l'hidrogen es veu endarrerit, no sols per les limitacions tècniques, sinó que també pot haver-hi interessos secundaris. Les grans companyies de combustibles fòssils mouen molts diners controlant absolutament tota la producció energètica del món. A aquestes companyies no els interessa

un desenvolupament sostenible del planeta sinó que pretenen que poc a poc depenguem més dels combustibles fòssils pel seu propi enriquiment. Però ja he esmentat diverses vegades durant el treball que aquests recursos no són infinits, sinó que un dia s'esgotaran. Aleshores ens veurem forçats a utilitzar mètodes alternatius, i personalment espero que ens conscienciem abans, de que el fenomen de la desaparició de combustibles fòssils ja hagi començat.

Per tant, i respecte al segon objectiu plantejat, crec fermament en un futur proper sense combustibles fòssils i també crec que un sistema de cooperació entre les energies renovables i l'economia de l'hidrogen és possible a través de la investigació científica i la conscienciació del problema energètic a la població en general. Un futur millor per tots, és possible.

Fonts Consultades

Bibliografia

- Ríos romero, Joaquín: *El treball de Recerca*, Editorial Rosa Sensat, 2008
- Verne J. (2001): *La Isla Misteriosa*, Publicació Original 1874
- Rifkin, J.: *La economía del hidrógeno*, Paidós, Barcelona, 2002.
- Caamaño, A; Obach, D: *Química "Oxigen" 2*, Teide, 2010
- Tamayo, F. *Producción de hidrógeno con energías renovables*, Aulas de Conocimiento de la energía, "Ciclo del Hidrógeno", Club Español de la Energía, De marzo de 2006.

Web-grafia

- <http://www.textoscientificos.com/quimica/hidrogeno> 10/07/12
- <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n37/aclop.html> 15/07/12
- http://www2.uah.es/edejesus/resumenes/QI/Tema_5.pdf 20/07/12
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Hidrogeno> 16/07/12
- <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/12346019/El-Agua-pesada-y-su-comercio-en-Argentina.html> 30/07/12
- http://maloka.org/fisica2000/isotopes/radioactive_decay.html 31/07/12
- <http://quimica.laguia2000.com/general/propiedades-del-hidrogeno> 01/08/12
- <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/hidrogeno> 01/08/12
- <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/hidrogeno/hidruros> 05/08/12
- <http://www.monografias.com/trabajos93/las-biomoleculas/las-biomoleculas.shtml> 09/08/12
- <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/h.htm> 15/08/12
- <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/hidrogeno/aplicaciones-industriales> 20/08/12
- http://noticiasdelaciencia.com/not/4831/nuevo_y_muy_barato_catalizador_para_una_extraccion_eficaz_de_hidrogeno_del_agua/ 30/08/12
- http://noticiasdelaciencia.com/not/4739/nuevo_metodo_para_extraer_hidrogeno_de_l_agua/ 20/08/12
- <http://quimica.laguia2000.com/compuestos-quimicos/hidruros-covalentes> 02/09/12
- <http://www.monografias.com/trabajos34/hidrogeno/hidrogeno.shtml> 03/09/12
- http://www.youtube.com/watch?v=c4BmmcuXMu8&list=FLq11G_gOMefuJbwLj7Ve1JA&index=21&feature=plpp_video 04/09/12
- http://www.youtube.com/watch?v=8LriocEzpc0&list=FLq11G_gOMefuJbwLj7Ve1JA&index=23&feature=plpp_video 05/09/12
- <http://www.educa.madrid.org/web/ies.victoriakent.torrejondeardo/Departamentos/DFyQ/Materiales/Bach-2/Material-Q/Temas/AMONIACO.pdf> 15/09/12
- <http://triplenlace.com/2011/12/12/como-se-produce-amoniaco-proceso-haber-bosch/> 20/09/12
- <http://www.ias.ac.in/resonance/Sept2002/pdf/Sept2002p69-77.pdf> 05/10/12

- <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/nitrogeno/compuestos-nitrogeno> 15/10/12
- <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/nitrogeno/acido-nitrico> 20/10/12
- <http://quimitube.com/quimicos-celebres-alfred-nobel-y-la-nitroglicerina/> 20/10/12
- <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/hidrogeno/aplicaciones-industriales> 10/11/12
- http://beautymarket.es/pelequeria/articulo_display.php?numero=3731 15/11/12
- http://www.consumer.es/web/es/bricolaje/albanileria_y_fontaneria/2002/09/27/52262.php 15/11/12
- http://www.paulgehring.com/es/%C2%BFa-verdad-sobre-el-amoniaco/?doing_wp_cron 20/11/12
- <http://empresas.villalbaactiva.org/oklim/limpieza-y-amoniaco/> 20/11/12
- <http://en.citizendium.org/wiki/Hydrocracking> 22/11/12
- <http://www.minambiente.gov.co/documentos/Guia2.pdf> 25/11/12
- http://www.ecured.cu/index.php/%C3%81cido_clorh%C3%ADrico 30/11/12
- http://www.youtube.com/watch?v=l6EKAH0b69s&list=FLq1G_gOMefuJbwLj7Ve1JA&index=25 01/12/12
- http://www.youtube.com/watch?v=7k_JyB_qJs4&list=FLq1G_gOMefuJbwLj7Ve1JA&index=7 01/12/12
- <http://www.udg.edu/LinkClick.aspx?fileticket=qifUssA0Vxs%3D&tabid=8702&language=ca-ES> 05/12/12
- <http://upcomillas.es/catedras/crm/descargas/2006-2007/libroH2-WEB.pdf> 06/12/12
- <http://www.oni.escuelas.edu.ar/2006/GCBA/1233/html/media/hidrogenocombustible.pdf> 08/12/12
- http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=7nVaftana0g#! 09/12/12
- http://ec.europa.eu/research/rtdinfo/42/01/print_article_1315_es.html 10/12/12
- <http://www.abc.es/20110619/ciencia/abci-volante-coche-hidrogeno-futuro-201106182020.html> 12/12/12
- <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/416/41616101.pdf> 15/12/12