



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

IMPLEMENTACIÓ DE LA PILA D'HIDROGEN ALS VEHICLES COMERCIALS



Memòria

Autor: Jordi Orrit Gratacós
Director: Antonio J. Sánchez Egea
Convocatòria: Maig 2022



Resum

El futur de l'automoció depèn de les energies sostenibles. No es contempla un escenari sense el cotxe elèctric, però no necessàriament ha d'estar basat en vehicles amb grans bateries de liti que depenguin d'un endoll per funcionar.

En aquest projecte s'exposa el paper de l'hidrogen com una font alternativa de combustible al sector de l'automoció. S'han analitzat des de les seves propietats fins a la seva usabilitat actual en automòbils ja comercialitzats.

En primer lloc, l'estudi reflecteix les fonts actuals d'obtenció de l'hidrogen i la infraestructura necessària per assumir la migració de l'actual parc de combustió cap a aquesta nova font d'energia. Per altra banda, compta amb una comparació dels diferents tipus de pila de combustible, així com les possibles millores que es plantegen.

El fet d'analitzar els prototips en què ja treballin les marques punteres de l'automoció ha estat un factor clau per poder estudiar a fons l'aplicació de l'hidrogen en casos reals i exitosos.

Per acabar, el projecte inclou un estudi pràctic de l'impacte ambiental de la implementació de la pila d'hidrogen als vehicles. És contrasta amb l'observació de l'empremta de la resta de tecnologies del mercat, com ara el cotxe elèctric, híbrid o de combustió interna.

L'objectiu d'aquest estudi és constatar la viabilitat de crear una infraestructura capaç de proveir els automòbils d'hidrogen verd, raó per la qual també s'ha elaborat l'anàlisi econòmica d'una hidrogena a Barcelona. Així, ha estat possible estudiar el comportament del preu de l'hidrogen verd i els factors que comprèn una inversió d'aquestes característiques. Finalment, el projecte conclou, a través de les línies estudiades, amb els pros i contres de la pila d'hidrogen –respecte a altres energies– i la viabilitat d'aquesta a curt termini.

Resumen

El futuro de la automoción depende de las energías sostenibles. No se contempla un escenario sin el coche eléctrico, pero no necesariamente debe estar basado en vehículos con grandes baterías de litio que dependan de un enchufe para funcionar.

En este proyecto se expone el papel del hidrógeno como fuente alternativa de combustible en el sector de la automoción. Se han analizado desde sus propiedades a su usabilidad actual en automóviles ya comercializados.

En primer lugar, el estudio refleja las actuales fuentes de obtención del hidrógeno y la infraestructura necesaria para asumir la migración del actual parque de combustión hacia esta nueva fuente de energía. Por otra parte, cuenta con una comparación de los distintos tipos de pila de combustible, así como las posibles mejoras que se plantean.

El hecho de analizar los prototipos en los que ya trabajan las marcas punteras de la automoción ha sido un factor clave para poder estudiar a fondo la aplicación del hidrógeno en casos reales y exitosos.

Por último, el proyecto incluye un estudio práctico del impacto ambiental de la implementación de la pila de hidrógeno en los vehículos. Se contrasta con la observación de la impronta del resto de tecnologías del mercado, como el coche eléctrico, híbrido o de combustión interna.

El objetivo de este estudio es constatar la viabilidad de crear una infraestructura capaz de abastecer a los automóviles de hidrógeno verde, por lo que también se ha elaborado el análisis económico de una hidrogenera en Barcelona. De esta manera ha sido posible estudiar el comportamiento del precio del hidrógeno verde y los factores que abarca una inversión de estas características.

Por último, el proyecto concluye, a través de las líneas estudiadas, con los pros y contras de la pila de hidrógeno –respecto a otras energías– y la viabilidad de ésta a corto plazo.

Abstract

The future of the automotive industry depends on sustainable energy. A scenario is not contemplated without the electric car, but it does not necessarily have to be based on vehicles with large lithium batteries that depend on a plug to operate.

This project discusses the role of hydrogen as an alternative source of fuel in the automotive sector. They have been analysed from their properties to their current usability in cars already marketed.

First, the study reflects current sources of hydrogen and the infrastructure needed to take on the migration of the current fuel park to this new energy source. On the other hand, it has a comparison of the different types of fuel cell, as well as the possible improvements that are proposed. To delve into the study of the application of hydrogen in the automotive sector, hydrogen in combustion will also be discussed, analysing the recent prototypes that some leading brands in the sector have published.

Finally, the project includes a practical study of the environmental impact of the implementation of the hydrogen fuel cell in vehicles. It contrasts with the observation of the footprint of other technologies on the market, such as the electric, hybrid or internal combustion car.

Finally, an environmental impact study is developed in order to compare the efficiency of the vehicle powered by a hydrogen fuel cell versus other technologies found on the market, such as the electric, hybrid or internal combustion car. Continuing with the proposal to create an infrastructure capable of supplying cars with green hydrogen, an economic analysis of a hydrogen plant in Barcelona is carried out, studying the behaviour of the price of green hydrogen and the factors that lead to an investment of these characteristics.

To conclude, the project will close with conclusions about the technologies that we currently know, its pros and cons, as well as its short-term viability.



Índex

Resum	2
Resumen	3
Abstract	4
Introducció	14
1.1. Objectius del projecte	14
Context de l'hidrogen	15
1.2. Informació general	15
1.2.1. Context energètic de l'Hidrogen	17
1.2.2. Potencial energètic de l'hidrogen	17
1.2.3. Tipus d'hidrogen segons la seva forma de producció i les seves emissions	18
1.2.4. El color de l'hidrogen.....	19
1.2.4.1. Fotoconversió	22
1.3. Infraestructura	23
1.3.1. Transport, emmagatzematge i distribució de l'hidrogen.....	23
1.3.1.1. Distribució per gasoductes	23
1.3.1.2. Emmagatzematge de l'hidrogen	24
1.3.1.3. Estacions de servei	26
Implementació de l'hidrogen en l'automoció	28
1.4. La pila d'hidrogen	28
1.4.1. Història.....	29
1.4.1.1. La pila d'hidrogen en l'automoció.....	31
1.4.2. Tipus de piles de combustible	38
1.4.2.1. Pila de combustible de membrana d' intercanvi de protons (PEM Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	39
1.4.2.1.1 Punts de millora de la pila PEM.....	42
1.4.2.2. Pila de combustible alcalina (AFC, Alkaline Fuel Cell)	44
1.4.2.3. Pila de combustible d'àcid fosfòric (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell)	46
1.4.2.4. Pila de combustible de carbonat fos (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell).....	48
1.4.2.5. Pila de combustible d'òxid sòlid (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell)	50
1.5. Aplicació de la pila de combustible en vehicles elèctrics	53
1.5.1. Components d'un cotxe de pila de combustible	54
1.5.1.1. Emmagatzematge del combustible	56
1.5.1.2. Unitat de control	60
1.5.1.3. Cel·les de potència	61

1.5.1.4.	L'equip elèctric	62
1.5.1.5.	Sistemes auxiliars	65
1.6.	Motors de combustió d'hidrogen.....	70
1.6.1.	Motor Wankel.....	71
1.6.1.1.	Parts i funcionament	72
1.6.1.2.	Aplicació de l'hidrogen	73
1.6.2.	Motor lineal i en V	74
1.6.2.1.	Motors de benzina i dièsel	75
1.6.2.2.	Aplicació de l'hidrogen al motor dièsel.....	76
1.6.2.3.	Aplicació de l'hidrogen al motor benzina.....	78
1.6.2.3.1	L'aposta japonesa	82
1.6.2.3.2	La patent de Ford.....	86
	Anàlisi de l'impacte ambiental	89
1.7.	Cas pràctic d'un usuari particular	89
1.7.1.	Extracció i processat de la matèria primera i fabricació	92
1.7.2.	Ús	95
1.7.3.	Gestió de residus	97
1.7.4.	Càlcul del cas pràctic.....	101
	Conclusions	106
1.8.	Anàlisi econòmic d'una hidrogenera	109
1.8.1.	Resum executiu	109
1.8.2.	Estudi de mercat.....	110
1.8.3.	Anàlisi DAFO	115
1.8.4.	Anàlisi intern.....	116
1.8.4.1.	Estratègia de recursos materials.....	116
1.8.4.2.	Estratègia de recursos humans	120
1.8.5.	Pla financer	121
1.8.5.1.	Desglossament econòmic	121
1.8.5.1.1	Planificació de costos	121
1.8.5.1.2	Planificació d'ingressos.....	122
1.8.5.2.	Indicadors de rendibilitat	124
1.8.5.2.1	Valor Actual Net.....	124
1.8.5.2.2	Taxa Interna de Retorn.....	125
1.8.5.3.	Conclusions i escenificació viable.....	126
	Bibliografia	128

Llistat de figures

Figura 1 - Tipus d'hidrogen _____	20
Figura 2 - Esquema de la sinergia de producció d'Hidrogen a partir de biomassa _____	21
Figura 3 – Pila de combustible R. Grove (1843) _____	30
Figura 4 – Pila de combustible operació Gemini (NASA) _____	30
Figura 5 - GM Electrovan _____	32
Figura 6 - BMW 750 hL _____	33
Figura 7 - El tren motriu del BMW i-Hydrogen NEXT _____	34
Figura 8 - Toyota FCHV-adv SUV en l'Auto Show de Washington (2010) _____	35
Figura 9 - Toyota Mirai Segona generació _____	36
Figura 10 – Esquema de la Pila PEM _____	40
Figura 11 - Esquema de la pila AFC _____	45
Figura 12 - Esquema de la pila PAFC _____	47
Figura 13 – Esquema de la Pila MCFC _____	49
Figura 14 - Esquema de la pila SOFC _____	51
Figura 15 - Esquema de funcionament cotxe amb pila de combustible. Font: BMW _____	54
Figura 16 - Propietats de l'H ₂ en funció de pressió i temperatura. Font: D. Enrique Calleja Ramos	57
Figura 17 - Tanc d'hidrogen Toyota Mirai _____	59

Figura 18 - Comparativa tancs d'hidrogen Toyota Mirai _____	60
Figura 19 - Disposició d'elements del Toyota Mirai 2020 _____	62
Figura 20 - Bateries ió-liti Mirai II. Fuente: Toyota _____	64
Figura 21 - Esquema de funcionament pila de combustible. Fuente: <i>James Larminie, Andrew Dicks.</i> _____	66
Figura 22 – Cicle de funcionament del motor rotatiu Wankel _____	72
Figura 23 - Motor Punch V8 _____	77
Figura 24 - Toyota Corolla Sport a les 24h de Fuji NAPAC Super. _____	83
Figura 25 - Lexus ROV. Font: Lexus _____	85
Figura 26 - Etapes de la vida útil d'un vehicle _____	91
Figura 27 - Reciclatge bateries vehicles elèctrics Duesenfelt _____	100
Figura 28 - Gràfic comparatiu impacte ambiental _____	103
Figura 29 - Ubicació de la hidrogenera _____	117

Llistat de taules

Taula 1 Característiques químiques de l'hidrogen.	17
Taula 2 - Tipus de Piles de combustible	39
Taula 3 - Materials Pila PEM	40
Taula 4 - Materials pila AFC	45
Taula 5 - Materials pila PAFC	48
Taula 6 - Materials de la pila MCFC	50
Taula 7 - Materials de la pila SOFC	52
Taula 8 - Tipus de tancs de combustible. Taula de creació pròpia	58
Taula 9 - Comparativa motor benzina i dièsel	75
Taula 10 - Comparativa 4T motors benzina i dièsel. (18)	76
Taula 11 - Distància anual de l'usuari	89
Taula 12 - Models per l'estudi de l'impacte ambiental. Font: creació pròpia a partir d'informació oficial.	91
Taula 13 - Etapes estudi ACN	92
Taula 14 - Impacte durant el procés de fabricació i obtenció de la matèria primera	95
Taula 15 - Impacte ambiental manteniments i averies	96
Taula 16 - Taula de manteniments	102
Taula 17 - Anàlisi DAFO	115

Taula 18 - Costos del pla financer B2E _____	121
Taula 19 - Previsió del cost de l'hidrogen _____	123
Taula 20 - Previsió de ventes i beneficis _____	123
Taula 21 - Planificació d'ingressos i despeses _____	125

Llistat d'equacions

Equació 1 - Reacció en l'ànode de la pila PEM	42
Equació 2 - Reacció en el càtode de la pila PEM	42
Equació 3 - Reacció global de la pila PEM	42
Equació 4 - Reacció en l'ànode de la pila AFC	46
Equació 5 - Reacció en el càtode de la pila AFC	46
Equació 6 - Reacció global de la pila AFC	46
Equació 7 - Reacció en l'ànode de la pila PAFC	48
Equació 8 - Reacció en el càtode de la pila PAFC	48
Equació 9 - Reacció global de la pila PAFC	48
Equació 10 - Reacció en l'ànode de la pila MCFC	50
Equació 11 - Reacció en el càtode de la pila MCFC	50
Equació 12 - Reacció global de la pila MCFC	50
Equació 13 - Reacció en l'ànode de la pila SOFC	52
Equació 14 - Reacció en el càtode de la pila SOFC	52
Equació 15 - Reacció global de la pila SOFC	52
Equació 16 - Excés d'oxigen al càtode	67
Equació 17 - Velocitat del flux d'oxigen a la pila	67

Equació 18 - Factor de conversió de potència _____	80
Equació 19 - Càlcul de la potència útil _____	80
Equació 20 - Càlcul de la potència útil _____	80
Equació 21 - Càlcul de la potència _____	81
Equació 22 - Distància anual _____	90
Equació 23 - Impacte ambiental vehicle elèctric i de pila d'hidrogen _____	101
Equació 24 - Impacte ambiental combustió interna _____	101
Equació 25 - Càlcul del VAN _____	124
Equació 26 - Càlcul del TIR _____	126
Equació 27 - Període de recuperació de la inversió (PRI) _____	127

Introducció

1.1. Objectius del projecte

Per poder arribar a l'objectiu principal del projecte, que serà veure la viabilitat d'aquesta tecnologia aplicada a l'automoció i estudiar si és més o menys factible que les altres tecnologies sostenibles del mercat, es plantegen els següents objectius:

1. **Estudiar les tecnologies** de la pila de combustible que existeixen a l'actualitat amb l'objectiu d'analitzar aspectes positius i negatius per a la implementació a un vehicle lleuger (generalment cotxes) i arribar a la conclusió de quin és la més adequada per una producció en sèrie.
2. **Estudiar els mètodes d'obtenció** de l'hidrogen i quin impacte mediambiental tenen, per acabar definint quin és el que convé implementar per obtenir una energia verda i quins costos tenen aquestes plantes.
3. **Analitzar actuals mètodes d'obtenció i emmagatzematge** que podem trobar en alguns països i concloure si són els idonis per poder proporcionar una xarxa de subministrament a l'usuari.
4. **Comparar** la pila d'hidrogen amb els altres sistemes de propulsió que coneixem a l'actualitat.
5. **Realitzar un estudi econòmic** en el que es pretén calcular la inversió mínima per obrir una primera hidrogena d'ús públic a Barcelona i estudiar la previsió del preu de l'hidrogen verd.
6. **Estudiar l'impacte mediambiental** d'un usuari particular que utilitza un cotxe propulsat per hidrogen per fer una mitjana de 20.000 km anuals i comparar-lo amb la resta de tecnologies comercialitzades a l'actualitat.

Context de l'hidrogen

1.2. Informació general

L'hidrogen és un dels elements més lleugers i abundants a tot l'univers. És el primer element de la taula periòdica, representat pel símbol H però més comunament expressat com a H_2 . La majoria de les vegades es presenta en forma gasosa. De manera similar a l'aigua, és inodor, insípid i incolor, a més, és un diatòmic no tòxic, no metàl·lic i altament inflamable. Al nostre planeta, l'hidrogen es pot trobar fàcilment, però comunament s'uneix a altres elements. L'hidrogen es pot unir fàcilment amb l'oxigen, formant la molècula d'aigua (H_2O) o hidrocarburs com el metà (CH_4) i altres minerals.

Va ser descobert inicialment per Cavendish en 1776, però Lavoisier el va nomenar l'any 1783. Un dels aspectes emocionants d'aquest element és que quan es va trobar cremat, va produir aigua. Per tant, quan Lavoisier ho va nomenar, va descriure les seves característiques en grec: hidro-aigua, gens-formant; significa faedor d'aigua o formador d'aigua. Aquesta característica que la uneix a l'aigua és la raó principal lligada a produir energia netament sense produir emissions de carboni. L'hidrogen té moltes propietats en diverses branques de la indústria, alguns exemples dels seus diferents usos són combustible per a coets així com fertilitzant (productor d'amoníac), tot i que també s'utilitza per refinar combustibles fòssils i en la indústria alimentària. Un altre ús de l'hidrogen és el seu ús en el mètode de fugida de gas i això és tant una avantatge com un desavantatge, ja que pot debilitar molts metalls, cosa que en dificulta l'ús en canonades i emmagatzematge en contenidors metàl·lics. (4)

La definició grega d'hidrogen és essencial ja que és un dels seus trets més importants per a aquest estudi, la possibilitat de produir aigua com a subproducte de la combustió al sector de la mobilitat i l'electricitat, que és una de les indústries líders en l'emissió de GEH i emissions de carboni a l'atmosfera que influeix en gran mesura a l'escalfament global.

És important assenyalar que tot i no ser una font primària d'energia com el petroli, el carbó o el gas natural, l'hidrogen es pot utilitzar tant com a font d'energia, com un dispositiu d'emmagatzematge o combustible.

Com s'ha esmentat anteriorment, l'hidrogen com a element costa de trobar a l'espai terrestre i, quan es produeix, s'ha de prendre d'altres compostos per esdevenir una font d'energia.

És per això que es diu portador de energia, que es comporta de manera molt similar a l'electricitat i que pot emmagatzemar energia, i quan es necessita l'energia, es pot alliberar a través de la conversió de la cel·la de combustible o la combustió.

Aquest element també s'utilitza per emmagatzemar energia procedent de fonts renovables, com a cèl·lules fotovoltaïques, turbines eòliques, turbines mareomotrius o biomassa, ajudant a solucionar el problema que tenen aquestes fonts renovables amb la intermitència. L'hidrogen es pot produir quan aquests sistemes d'energia renovable produeixen massa electricitat (generalment durant l'estiu) per reconvertir-lo en electricitat quan es necessiti.

Quan s'aconsegueix aïllar l'element, aquest es pot utilitzar com a combustible, agent d'hidrogenació, reactiu, gas traçador o, com en dècades passades per aixecar globus (ja que l'H₂ és més lleuger que l'aire), com en el cas del Zeppelin. Però el més important és que l'hidrogen es pot utilitzar com a combustible per als sectors del transport i la indústria.

Finalment, l'hidrogen té el contingut energètic més alt de qualsevol combustible convencional a pes (tres vegades més que la gasolina). Per contra, a causa del seu estat gasós, també ocupa molt espai.

Avui dia, la major part de la producció d'hidrogen es fa mitjançant reformat de metà amb vapor (SMR) o com a subproducte de reactors nuclears o biomassa. Els 70 milions de tones de H₂ és principalment per entorns industrials, sobre tot destinat a la indústria química i a la refinació de petroli. S'estima que només el 2% es destina com a combustible o emmagatzematge d'energia. (5)

Propietats de l'Hidrogen	
Z	1
Pes atòmic (126C)	1.0079
Densitat (g/ml)(t^a eb)	0.0700
Volum molar mls (t^a eb)	28.6
Punt de fusió °K	13.957 °K a 54mm. (punt triple)
Punt d'ebullició °K	20.39 °K
Calor de vaporització KJ mol-1	0.903
Potencial de ionització eV	13.54
Energia d'hidratació H- cal mol-1	269

Energia d'enllaç H-H- cal mol⁻¹	104.2
Radi covalent (en H₂)	0.3707
Electroafinitat eV	0.715
Radi iònic H-X (en LiH)	1.36
Electronegativitat (P)	2.1
Abundància % (litosfera-hidrosfera)	1% (15.4 àtoms % γ)

Taula 1 Característiques químiques de l'hidrogen. Font: elaboració pròpia.

1.2.1. Context energètic de l'Hidrogen

Per què es parla tant del potencial de l'hidrogen com a font d'energia? És possible l'ús generalitzat de l'hidrogen, l'element químic més abundant i lleuger de l'univers, com a combustible no contaminant?

En els darrers temps la possibilitat ha cobrat més força que mai com a alternativa realment viable i extensible a la producció energètica global. A més, és una idea que en realitat ve de lluny: el primer motor de combustió de la història va funcionar precisament amb hidrogen, i ja s'ha fet servir aquesta tecnologia en els coets que propulsen les naus espacials.

El debat sobre la transició energètica i la lluita contra el canvi climàtic és complex i resulta fàcil perdre's entre conceptes com “hidrogen renovable”, “hidrogen verd”, “hidrogen blau” o “hidrogen de baixes emissions”. En aquest post es dóna llum sobre el potencial d'aquesta font d'energia i la terminologia emprada.

1.2.2. Potencial energètic de l'hidrogen

El potencial de l'hidrogen per proporcionar energia neta i assequible és enorme: la combustió d'un quilo d'hidrogen genera tres vegades més energia que la d'un quilo de benzina i és l'element químic més abundant a l'univers. Fins aquí tot són bones notícies.

Tot i això, l'hidrogen no es presenta de forma aïllada sinó formant part de molècules més complexes, com l'aigua o els hidrocarburs. De la mateixa manera que un mineral ha de ser processat, fos i transformat per poder ser utilitzat o que el petroli ha de passar per diversos

processos de refinació per obtenir els combustibles, l'hidrogen ha de ser produït (extret de les molècules que el contenen) i emmagatzemat.

Aquest procés exigeix grans quantitats d'energia provinents, fins ara, majoritàriament de fonts no renovables. De fet, gairebé la totalitat de l'hidrogen es produeix a partir d'hidrocarburs com el gas natural i el carbó, fent que la seva pròpia producció sigui una font d'emissions de CO₂.

Així que hi ha dues possibilitats per aprofitar el potencial de l'hidrogen a la lluita contra el canvi climàtic:

- Reduir les emissions dels processos industrials que requereixen hidrogen, fonamentalment a la indústria del refinament (és necessari per a la transformació del petroli) i la petroquímica (s'utilitza per produir amoníac).
- Utilitzar el propi hidrogen com a font d'energia emmagatzemable que garanteixi la seguretat del subministrament elèctric de fonts renovables, en moments de no disponibilitat de les mateixes.

1.2.3. Tipus d'hidrogen segons la seva forma de producció i les seves emissions

La molècula d'H₂ és la mateixa independentment del seu origen, com la molècula de CO₂ és la mateixa que surti d'un tub d'escapament o una foguera de campament. Però l'H₂ no es troba com a tal a la natura, així que s'ha d'obtenir a partir d'altres molècules, sigui quin sigui el seu ús final.

Bàsicament hi ha dues fonts per aconseguir aquest hidrogen, segons la seva forma de producció:

- 1) Hidrogen a partir de fonts fòssils. Es produeix en descompondre les molècules d'hidrocarburs (C_xH_y) a partir de combustibles fòssils (petroli, gas natural, carbó) i vapor d'aigua alta temperatura, generant CO₂ com a subproducte. Avui dia, la gran majoria de l'hidrogen produït a tot el món s'obté per aquesta via.
- 2) Hidrogen a partir d'electricitat: la molècula d'aigua (H₂O) es trenca mitjançant l'aplicació de corrent elèctric. El consum d'electricitat és enorme i, encara que el procés

per si mateix no genera emissions directament, cal tenir en compte l'origen de l'electricitat utilitzada.

És a dir, les emissions de CO₂ relacionades amb l'hidrogen s'han de tenir en compte al llarg de tot el cicle de vida del producte i no només durant la utilització (emissions directes). És per això que la reducció d'emissions es pot fer per dues vies:

- La captura del CO₂ emès. El límit tècnic és actualment al 90 % del CO₂, per la qual cosa per arribar a les emissions netes zero s'ha de compensar amb accions addicionals com, per exemple, la reforestació.
- L'ús d'electricitat d'origen 100% renovable. L'hidrogen electrolític renovable depèn de poder comptar amb un mix elèctric generat tan sols per energies renovables (eòlica, solar).

L'hidrogen que s'ha produït reduint el nivell d'emissions durant tot el cicle de vida s'anomena hidrogen de baixes emissions, independentment que es tracti d'hidrogen a partir de combustibles fòssils amb captura de CO₂ o d'hidrogen a partir d'electricitat.

Només podem parlar d'hidrogen renovable (també anomenat hidrogen net), quan les emissions al llarg de tot el cicle de vida siguin zero o gairebé zero. Aquest seria l'objectiu a aconseguir, encara que avui encara requereix més desenvolupament tecnològic, com veurem en el proper apartat.

1.2.4. El color de l'hidrogen

Tal i com s'ha esmentat en l'apartat anterior, un dels termes més populars per parlar del potencial de l'H₂ a la transició energètica és “hidrogen verd”. Com que l'adjectiu verd se sol associar amb “ecològic” o “sostenible”, aquesta terminologia s'ha estès en resultar intuïtiva per a la ciutadania en general.

La realitat és una mica més sofisticada i l'hidrogen verd es relaciona amb una classificació per colors segons la forma de producció, semblant a la que esmentàvem abans, però que cal aclarir.

- **Gris:** L'hidrogen gris és el que genera una quantitat significativa d'emissions de GEH, principalment CO₂. Majoritàriament prové del gas natural i és el més barat de produir.
- **Blau:** L'hidrogen blau és el que genera emissions de CO₂ que es capturen per ser emmagatzemades o reutilitzades (per exemple, per fabricar eco combustibles). És un hidrogen de baixes emissions i és el més viable per reduir emissions a curt i mitjà termini.
- **Verd:** L'hidrogen verd és també anomenat “hidrogen net” i es correspon amb l'hidrogen renovable, és a dir, aquell que no genera pràcticament cap mena d'emissions durant la seva producció. El desenvolupament de tecnologies competitives i de cost eficients és prometedor, però els experts consideren que encara queda un camí perquè resulti econòmicament eficient.
- **Marró:** és un tipus d'hidrogen semblant al gris, però generat a partir del carbó.

El 2019 l'Agència Internacional de l'Energia va utilitzar aquesta classificació a l'informe *The Future of Hydrogen*, amb la qual cosa ha guanyat força popularitat. Tot i que la distinció per colors és útil en un context divulgatiu, en termes tècnics, és inconsistent amb la legislació europea, en què s'ha optat per parlar d'hidrogen de baixes emissions” i “hidrogen renovable” a l'hora de planificar el desplegament aquesta tecnologia. A la **Figura 1** podem veure una taula amb les principals característiques dels tipus d'hidrogen. (3)

A continuació s'explicaran els 4 colors d'hidrogen de forma més extensa, centrant-nos en el hidrogen verd, ja que serà l'utilitzat en el cas pràctic d'aquest projecte.



Figura 1 Tipus d'hidrogen

L'hidrogen pot produir-se a partir de la biomassa. Tenint en compte l'obligació d'augmentar la quota de biocombustibles i la comptabilitat més favorable d'aquests en el cas del seu caràcter de residus, sembla més beneficiós produir hidrogen a partir de matèries primeres de residus biogènics. Aquests poden incloure, entre altres, residus de fleca (per a la producció d'etanol, convertit en hidrogen en el procés de reformat), glicerina crua (enviada a piroreformatió), residus de fusta (sotmesos a gasificació i posterior reformat) i biogàs (dirigit al reformat amb vapor). La gasificació de la biomassa es realitza mitjançant un reactor de llit fluiditzat, en el qual s'obtenen productes gasosos i, amb l'ús d'equips associats es recupera l'hidrogen. Per a obtenir hidrogen, l'oli obtingut de la piròlisi de la biomassa també pot sotmetre's al reformat amb vapor obtingut també com a resultat de la piròlisi de la biomassa, una mescla d'àcids carboxílics, alcohols, aldehids i cetones.

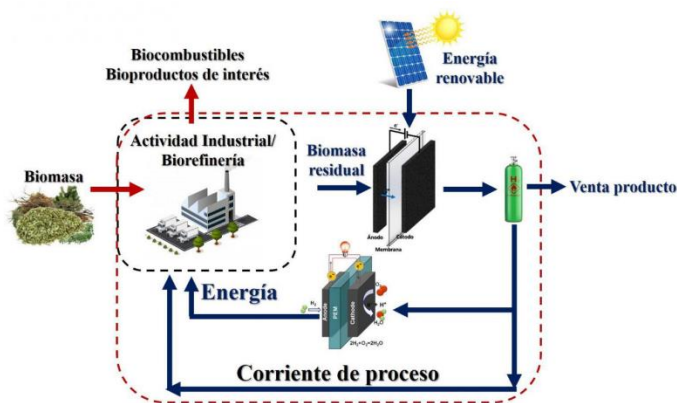


Figura 2. Esquema de la sinergia de producció d'Hidrogen a partir de biomassa

El factor decisiu en el procés de reformat amb vapor és la proporció de vapor al carboni contingut a l'oli. Calent aquest fins a una temperatura de 800 °C i utilitzant el catalitzador CeZrO₂ amb aditius Pt i Rt al reformat d'oli pirolític de fusta, es pot obtenir fins a un 70% d'hidrogen. Els mètodes mixtos de producció d'hidrogen a partir de biomassa són molt importants. Un d'ells és un mètode que combina la gasificació de la biomassa a llit fluiditzat i el reformat del gas brut obtingut en el procés de la seva piròlisi.

La piròlisi ràpida de biomassa seca en un llit fluiditzat es produeix a 530 °C. El biooli es condensa per al seu posterior processament mentre que el carbonat i els gasos de piròlisis es cremen per a escalfar el reactor. El biooli, que és un producte de molts processos de piròlisis independents, se sotmet a una separació per extracció en una fracció de lignina i una altra d'hidrats de carboni, i el procés de reformat catalític amb vapor a 850 °C sota una pressió de

3,5 MPa. En dues ocasions posteriors en el reactor del sistema (per a condicions de 370 °C, 3 MPa i 200 °C, 2,5 MPa) es produeix un gas ric en hidrogen, a partir del gas de síntesi, desplaçant l'estat d'equilibri segons la reacció homogènia del gas d'aigua. Finalment, l'hidrogen pur s'obté després de la purificació per PSA. (4)

L'hidrogen també pot extreure's mitjançant mètodes de reformat utilitzant biogàs com a matèria primera. El reformat amb vapor és molt adequat per a aquesta fi. El biogàs utilitzat en el reformat es produeix en plantes de biogàs agrícola, plantes de tractament d'aigües residuals o abocadors en la digestió anaeròbica de matèries primeres orgàniques. Un altre exemple de matèria primera qualificada com a residu i apta per a la producció d'hidrogen és la glicerina crua com a subproducte de la producció de FAME, quan es produeix FAME a partir d'oli usat, el subproducte resultant és la glicerina.

1.2.4.1. Fotoconversió

La fotoconversió és una manera d'obtenir hidrogen a partir de la reducció de l'oxigen molecular. Per a aquest procés s'empren diferents fotosistemes, ja siguin biològics o químics, aquests fotosistemes capten la llum visible per a la formació d'hidrogen. Centrarem l'atenció en el fotosistema biològic. Segons estudis de la universitat de Còrdova en la unió del bacteri *Escherichia coli* i l'alga verda unicel·lular *Chlamydomonas reinhardtii* es troba clau d'un futur més verd, ja que quan aquests dos organismes treballen en conjunt augmenta la producció d'hidrogen en un 60%.

L'alga és capaç de produir hidrogen a partir del seu procés natural de fotosíntesi, mentre que els bacteris formen l'hidrogen degut a un procés de fermentació dels sucres; produint àcid acètic, això suposa una problemàtica per al bacteri ja aquest àcid provoca que la fermentació es detingui. Però el que per al bacteri és un problema, és un benefici per a l'alga, ja que l'alga produeix més quantitat d'hidrogen aprofitant-se de l'àcid, generant una perfecta sinergia entre tots dos organismes. Ja que aquesta aportació de sucre podria provenir de residus, d'aquesta manera s'ajudaria a reduir la quantitat de CO₂ a l'atmosfera alhora que produïm hidrogen.

Un dels majors problemes que acompanya a aquesta evolució energètica és la disminució de les reserves de combustibles fòssils i el consegüent augment dels preus de l'energia. El desenvolupament industrial també porta amb si efectes adversos; efectes, com la

contaminació ambiental. Això fa necessària la cerca de fonts d'energia "netes" i formes eficients d'estalviar-la. L'ús de fonts d'energia renovables, com la solar, l'eòlica, la hidroelèctrica o la mareomotriu, és cada vegada més popular, tot i que una altre solució interessant és l'energia procedent de l'hidrogen. La idea principal és utilitzar l'hidrogen com a portador d'energia, en contrast amb l'enginyeria energètica tradicional, en la qual els electrons són el principal portador d'energia.

1.3. Infraestructura

1.3.1. Transport, emmagatzematge i distribució de l'hidrogen

En l'actualitat, generalment l'hidrogen és produït al mateix lloc on es necessita. En altres situacions, però, aquest gas necessita ser traslladat d'una zona a una altra recorrent distàncies no menors. A més, l'hidrogen pot ser usat de diverses maneres, per la qual cosa és important considerar com guardar-lo i desplaçar-lo d'un lloc a un altre.

És per això que hi ha diferents maneres d'emmagatzemar i transportar l'hidrogen, les que es poden classificar d'acord amb l'estat físic del gas en cada situació: líquid, sòlid o gasós; o bé, d'acord amb la tecnologia emprada per al seu desplaçament respectiu.

1.3.1.1. Distribució per gasoductes

La utilització industrial de l'hidrogen a gran escala a la indústria química va ser marcada el 1938 per la construcció d'un gasoducte per al transport d'hidrogen a la regió del Ruhr, a Alemanya. Avui, aquest gasoducte és explotat per la firma francesa Air Liquide permetent el transport d'hidrogen cap a 14 llocs industrials de la indústria química, petroquímica i dels gasos.

En total, Europa Occidental i els Estats Units consten d'un total de 1500 i 1150 km de gasoductes per a hidrogen, respectivament. Altres instal·lacions, encara que menys importants, existeixen a Tailàndia i Amèrica del Sud. Aquestes canalitzacions són construïdes en acer clàssic i tenen un diàmetre comprès entre els 100 i 300 mm que permeten transportar el gas a pressions 0,34 i 10 MPa.

Els costos d'inversió van en funció del diàmetre de les canonades (això és aplicable tant en el cas de l'hidrogen com al de gas natural), però per transportar hidrogen, com la seva densitat energètica per unitat de volum és aproximadament una cinquena part de la del gas natural, es necessita o bé una canonada de major diàmetre o més pressió per subministrar la mateixa quantitat d'energia. A igualtat de capacitat energètica de la línia de transport, el cost total d'una línia per a hidrogen és de l'ordre de sis vegades el de gas natural. (3)

Actualment Espanya pretén jugar un paper molt important en la distribució d'hidrogen per gasoductes. Per la seva situació geogràfica, estant a prop d'Àfrica on es poden construir plantes renovables a baix cost, Espanya podria ser el principal *Hub* de proveïment d'hidrogen a tota Europa, de la mateixa manera que s'està procurant aconseguir aquest fet amb el gas natural provinent d'Argèlia.

1.3.1.2. Emmagatzematge de l'hidrogen

- **Emmagatzematge en forma de gas pressuritzat**

Aquest emmagatzematge consisteix en guardar l'hidrogen en la seva forma lliure, sense que s'uneixi o sigui absorbit per altres materials. En aquest procés juga un paper essencial la pressió i la temperatura, ja que amb elles es procura maximitzar la capacitat volumètrica i gravimètrica de l'hidrogen, sobre tot en aplicacions al transport, entenent per capacitat gravimètrica la relació entre la massa d'hidrogen emmagatzemada i la capacitat volumètrica del tanc (en tant per cent), mentre que la capacitat volumètrica és la massa d'hidrogen emmagatzemada per unitat de volum.

L'emmagatzematge de gas sota pressió presenta nombrosos avantatges quan la quantitat no sobrepassa les desenes de quilograms. Una aplicació a aquesta forma és el cas dels vehicles on l'hidrogen pressuritzat, més detallat en l'apartat **1.5.1.1**.

L'ús de noves tecnologies de tancs d'emmagatzematge mitjançant estructures reforçades amb fibres de vidre, fibres d'aramida i fibres de carboni sobre acer, permet l'emmagatzematge d'hidrogen comprimit entre 350 i 700 bar. Els darrers desenvolupaments han mostrat la possibilitat d'emmagatzemar al voltant de 38 litres d'hidrogen (uns 1,5 quilograms) en tancs de massa entre 28 i 40 kg. Aquestes dades són molt rellevants a l'hora

d'emmagatzemar el gas en un vehicle, ja que el tanc suposarà molt més pes que l'hidrogen en sí.

- **Emmagatzematge en forma criogènica**

L'emmagatzematge en forma líquida permet obtenir una massa específica elevada de 70,9 kg/m³. Això s'aconsegueix mitjançant la criogenització de l'hidrogen, o dit altrament, canviar l'estat del gas baixant considerablement la seva temperatura (al voltant de 20K). Aquest s'emmagatzema en recipients de doble aïllament tèrmic que tenen com a objectiu limitar les aportacions de calor de l'exterior. A causa de la naturalesa de l'hidrogen, una de les dificultats més grans consisteix en l'evaporació permanent, cosa que es tradueix en una pèrdua en pes d'aproximadament un 0,5% per dia. De moment, aquesta solució d'emmagatzematge a temperatura criogènica s'utilitza al sector espacial, per a tancs d'hidrogen, combustible per a coets, i està sent fortament considerada al món de l'aeronàutica. Aquesta solució és preferible al tanc pressuritzat per raons d'espai i seguretat. En efecte, la densitat de l'H₂ líquid és molt més gran que la del gas pressuritzat, cosa que permet emmagatzemar la mateixa quantitat d'hidrogen en un volum reduït. A més, això evita l'ús d'altres pressions (700 bars) i els riscos inherents a aquesta solució. (6)

- **Emmagatzematge en forma líquida**

L'hidrogen es pot emmagatzemar en forma líquida a temperatures criogèniques (-253°C). Com a principal avantatge l'hidrogen líquid ofereix la seva densitat energètica per unitat de volum (molt superior a la de l'hidrogen gas) fins i tot a relativament baixes pressions. Tanmateix, també presenta importants desavantatges encara que el seu ús al sector automoció ja hagi estat provat per alguns fabricants importants (BMW). Aproximadament, en el procés de liquació del hidrogen es perd del 30 al 40% de l'energia. (3)

El transport de l'hidrogen líquid es fa a través de camions, ferrocarrils i vaixells, cadascun amb capacitats diferents. L'hidrogen és transportat en forma líquida només per una qüestió de costos. Un camió que porta hidrogen líquid seria reemplaçat per uns 30 camions que porten hidrogen gasós.

- **Emmagatzematge en forma sòlida**

Hi ha dues possibilitats d'emmagatzemar l'hidrogen en forma sòlida: d'una banda, hi ha l'adsorció que es pot fer sobre carbó a 77 K i 100 bar permetent emmagatzemar dues vegades més hidrogen que l'emmagatzematge sota pressió, a la mateixa pressió; i per altra banda, és possible l'absorció d'hidrogen que permet la combinació química reversible de l'hidrogen amb materials metàl·lics. Diversos metalls i aliatges com els de magnesi, titani, ferro, manganès, níquel o crom formen hidrurs metàl·lics quan es troben en presència d'hidrogen. Els àtoms d'hidrogen s'empaqueten dins de l'estructura metàl·lica, degut a això es poden aconseguir unes densitats d'emmagatzematge d'hidrogen més grans que amb hidrogen comprimit. De manera similar a com passava amb les bombones d'acer, el problema d'aquest tipus d'emmagatzematge és que els metalls són molt pesats per se, cosa que pot llastar diferents aplicacions en què el pes sigui un factor determinant. Per alliberar l'hidrogen dels hidrurs metàl·lics per al seu ús, cal calor; de fet, la calor residual generada per la pròpia pila de combustible és suficient per alliberar l'hidrogen de la xarxa dels hidrurs metàl·lics de baixa temperatura, si bé no s'allibera d'una manera instantània. (7)

1.3.1.3. Estacions de servei

Les estacions de servei són el principal inconvenient amb el que ens trobem actualment a l'hora de comprar un cotxe propulsat per pila d'hidrogen. De la mateixa manera que succeeix amb els cotxes de combustió, els cotxes d'hidrogen necessiten carregar els seus tanques per seguir circulant, i l'escassetat d'estacions de servei són el principal problema a Europa. Fins a dia d'avui s'han construït al voltant de 400 estacions de servei al Món. En general subministren l'hidrogen o bé a pressió de 350 bar o líquid, i disposen o bé de sistemes de producció de l'hidrogen in situ, fonamentalment basats en reformat de gas natural o en electròlisi d'aigua, o bé reben l'hidrogen des de plantes de producció centralitzades. No obstant, mentre no existeixi un mercat de l'hidrogen com combustible amb una demanda definida a Europa. Sembla lògic pensar que, inicialment, el creixement del nombre d'estacions de servei es basarà en un sistema de producció distribuït a l'entorn de nuclis urbans que, en etapes successives, es anirà interconnectant entre si alhora que enllaçant-se amb plantes centralitzades conforme el creixement de la demanda ho justifiqui.

El procés de construcció d'estacions de servei serà el que doni sentit a la migració del parc de cotxes que utilitzen altres combustibles cap aquesta nova font d'energia. Degut a les tecnologies que s'empren actualment i a l'elevat cost de l'hidrogen per electròlisi, els primers projectes que es duguin a terme a Europa tindran probablement poc sentit econòmic, però seran els que impulsaran l'inici de la infraestructura necessària, i amb això, faran viable el fet de comercialitzar cotxes propulsats per hidrogen en el marc europeu.

Així mateix, el tipus de tècnica de producció i la manera com es dispensi l'hidrogen (gas o líquid) dependrà, en última instància, del que consumeixin els vehicles que arribin a proveir. Fins ara present, la major part dels projectes de demostració es corresponen amb vehicles que consumeixen hidrogen gas i, només uns quants, hidrogen líquid.

A les primeres etapes, les flotes de vehicles que operen en entorns urbans (autobusos, furgonetes de repartiment) o els vehicles que utilitzen més d'un combustible (per exemple vehicles híbrids a hidrogen i gasolina), jugaran un important paper en aquesta evolució cap a un cicle virtuós sostenible on més infraestructura crearà més demanda d'hidrogen i, aquesta alhora, la necessitat d'una infraestructura més gran. (3)

La Unió Europea, en l'aposta per l'hidrogen, exigirà als seus països membres un punt de recàrrega d'hidrogen cada 150 quilòmetres. Aquesta mesura està emmarcada dins del Pacte Verd Europeu i té com a objectiu construir una estació de servei cada 150 km a la xarxa transeuropea i que entre ells només hi hagi 450 km. (4)

En l'estudi econòmic d'aquest treball, s'estudiarà la viabilitat econòmica que té construir una hidrogenera, així com tots els elements indispensables que ha de tenir aquesta i com està relacionat el preu de l'hidrogen i la venda a clients finals amb el retorn de la inversió (**Apartat** ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

Implementació de l'hidrogen en l'automoció

1.4. La pila d'hidrogen

La pila d'hidrogen, també anomenada cel·la de combustible és un dispositiu electroquímic capaç de transformar de manera directa l'energia química en elèctrica. Parteix d'un combustible (en aquest cas hidrogen) i d'un oxidant per produir aigua, calor i electricitat en forma de corrent contínua. (1)

Les piles de combustible són com bateries, però que no s'esgoten ni necessiten recarregar-se mentre se'ls subministri hidrogen. Els reactius es troben fora de la pila, en aquest cas en dipòsits d'alta pressió que aguanten pressions superiors a 1.000 bars, tot i que la pressió d'emmagatzematge de l'hidrogen en l'automoció sigui, normalment, de 700 bars. Per tant, trobem la primera avantatge de enfront de les bateries convencionals, ja que la pila és capaç de generar energia de manera ininterrompuda sempre i quan es disposi de combustible, solucionant d'aquesta manera els principals problemes de les bateries elèctriques que són la capacitat limitada d'emmagatzematge d'energia i la vida finita que tenen aquestes.

En sí mateixes, són reactors electroquímics que transformen l'energia química en electricitat, sense necessitar cap procés de combustió. Al no produir-se combustió, s'evita la producció de CO₂ i altres gasos contaminants propis dels sistemes d'obtenció d'electricitat tradicionals. Una altre avantatge de gran importància és que, al no comptar amb processos de combustió, el seu rendiment no està limitat per les lleis de Carnot. Gràcies a aquest fet, el dispositiu és capaç d'aconseguir eficiències relativament altes que aplicades a la pràctica poden trobar-se al voltant d'un 40% o 50% , podent arribar fins un 85% o 90% en cogeneració, és a dir, capturant l'energia calorífica que desprèn per donar-li un ús posterior. En conseqüència, aquesta eficiència pot donar lloc a una elevada energia específica comparant-la amb altres tecnologies d'emmagatzematge electroquímic.

Altres avantatges de la pila d'hidrogen a l'hora de decantar-se per una tecnologia o una altre són:

- Al estar compostes per cel·les fixes, no produeixen vibracions ni sorolls i, teòricament, necessiten poc manteniment.

- Gràcies al seu caràcter modular tenen major fiabilitat, menors costos i són capaces d'augmentar o disminuir la potència sense variar el rendiment.
- És un sistema amb molt poca inèrcia, que permet seguir la corba de demanda gairebé sense retràs.

Aquestes són només algunes de les característiques que fan que aquesta tecnologia es presenti com un dels sistemes amb major potencial d'aplicació a la mobilitat, que té com a objectiu allunyar-se de la dependència dels combustibles fòssils i les emissions contaminants. (2)

1.4.1. Història

Tot i que ens sembli que la pila de combustible és un descobriment relativament recent, va ser al segle XIX, concretament a l'any 1839 quan el Sr. William Robert Grove va demostrar que la combinació d'hidrogen i oxigen generava electricitat, aigua i calor.

Tres anys més tard, el jurista gal·lès va desenvolupar la primera cel·la de combustible capaç de produir electricitat combinant hidrogen i oxigen i ho va aconseguir utilitzant dos elèctrodes de platí submergits en àcid sulfúric que alimentava amb oxigen i hidrogen respectivament. Els elèctrodes fabricats en platí estaven exposats als dos àcids i separats per un material ceràmic d'alta porositat que feia més fàcil l'intercanvi químic.

A partir de la dissociació del H_2SO_4 , la reducció es produïa a l'elèctrode alimentat per oxigen (càtode), que reaccionava amb els ions H^+ formant aigua. En aquesta reacció intervenien els electrons que eren generats al ànode durant l'oxidació de l' H_2 , el qual reaccionava amb el ió SO_4^{2-} i formava àcid sulfúric. Tal i com veiem a la Figura 3 – Pila de combustible R. Grove (1843) , connectant diversos dispositius en sèrie aconseguia utilitzar-los com a generador elèctric per descompondre l'aigua, en el que és conegut com “La bateria de gas”.

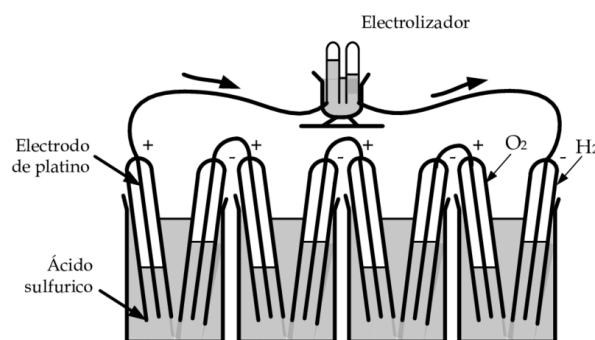


Figura 3 – Pila de combustible R. Grove (1843) (8)

Però el veritable avenç tecnològic no va arribar fins més tard, concretament al 1952, quan Francis T. Bacon va construir una pila de 5 kW basada en la tecnologia Hidrogen/oxigen que havia estat desenvolupant des de 1932. A diferència dels primers investigadors de la pila de combustible que utilitzaven elèctrodes de platí porós i àcid sulfúric que eren cars i corrosius, Bacon va millorar els catalitzadors utilitzant un electrolit alcalí que era menys corrosiu i elèctrodes de níquel més econòmics que els de platí. Amb aquest descobriment, Bacon va ser capaç d'alimentar una màquina de soldar i va anomenar al disseny de la pila de combustible “Bacon Cell”.

Als anys seixanta, les patents que havia desenvolupat Francis T. Bacon es van utilitzar al programa espacial d'Estats Units anomenat Gemini. Amb la pila de combustible que podem veure a la **Figura 4** es pretenia alimentar als astronautes d'aigua potable i electricitat gràcies a la senzillesa de la reacció química.

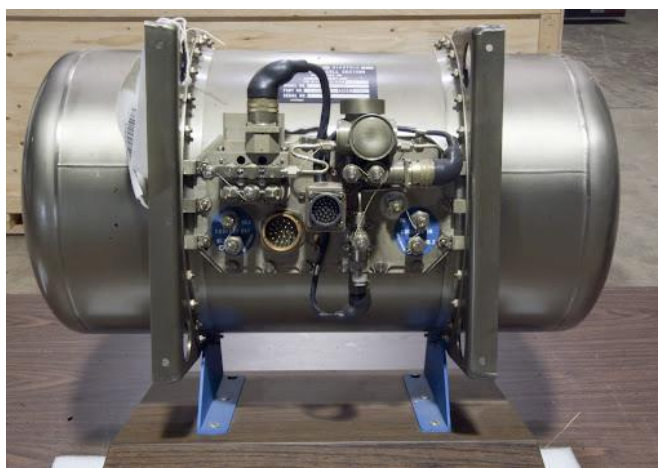


Figura 4 – Pila de combustible operació Gemini (NASA) (9)

Tot i que es fessin grans avenços durant el segle XIX fins mitjans del XX, va ser a partir de l'any 1973 quan es va produir un gran increment a l'estudi de fonts energètiques sostenibles degut a la crisi energètica mundial. Els investigadors i empreses relacionades amb aquest sector, han estat buscant la reducció del cost de la tecnologia i la millora de l'eficiència de les piles mitjançant l'ús de nous materials i matèries primeres.

1.4.1.1. La pila d'hidrogen en l'automoció

Per comprendre els inicis de la implementació de la pila d'hidrogen en l'automoció és necessari remuntar-se anys enrere i estudiar els diferents prototips que algunes marques van llençar al mercat, ja que van ser aquestes marques les que van invertir en millorar aquesta font d'energia per fer-la aplicable als automòbils.

- **Projecte GM**

Els primers pioners en l'ús de l'hidrogen com a combustible van ser els responsables de l'empresa Nord-Americana General Motors (GM), ja que se'n van adonar que aquesta tecnologia els podia ser útil per alimentar els seus vehicles elèctrics i van destinar part del seu pressupost a investigar sobre el tema.

A principis dels 60 l'empresa va desenvolupar un primer vehicle que van anomenar Electrovaïr i utilitzava un conjunt de cel·les de combustible, bateries i un motor elèctric CA d'inducció. La furgoneta utilitzava hidrogen i oxigen per generar electricitat amb la que alimentar el motor. Faltaven uns anys per la crisi energètica de 1973, que motivaria a més fabricants a buscar formes més eficients per propulsar els vehicles.

Els encarregats de donar vida al projecte van treballar de manera incrojectes d'Enginyeria Futurística de General Motors, Craig Marks, que tenia una missió molt clara: generar un vehicle elèctric de pila de combustible d'hidrogen. De fet, no era el primer cop que ho intentaven, els projectes Electrovaïr I i II, muntats sobre la base dels Chevrolet Corvaïr eren els antecedents de la marca amb la pila d'hidrogen, tot i que no van donar el resultat esperat.



Figura 5 - GM Electrovan (8)

El primer GM Electrovan es quedava molt curt de prestacions, motiu pel qual es va dissenyar el GM Electrovan II partint desde zero, utilitzant unes bateries de plata-zinc de 532 V que milloraven la capacitat a les que muntava l'anterior, amb l'inconvenient de donar una autonomia, en el millor dels casos, que envoltava els 130 km i que presentaven una durabilitat de cicles de càrrega molt limitada.

Per millorar aquests predecessors es va dissenyar un nou concepte en forma de furgoneta. La GM Electrovan (**Figura 5**) subministrava una potència contínua de 32 kW, amb un màxim de 160 kW. Composta per 32 mòduls, la pila estava acompanyada dels dipòsits d'hidrogen i oxigen líquids pels 45 litres de hidròxid de potassi que utilitzava com a electròlit, i casi 170 m³ de tubs de plàstic per canalitzar els diferents elements.

Finalment, en la posada en proves en circuit, ja que la furgoneta no es va arribar a comercialitzar per temes de seguretat, l'automòbil donava una velocitat de 113 km/h i comptava amb una autonomia de més de 240 km, a més presentava una molt bona acceleració gràcies a la màquina elèctrica.

- **Projecte BMW Clean Energy 2006**

L'any 2006, el fabricant alemany BMW i la companyia petrolífera Total van arribar a un acord sobre cooperar estretament per promoure el hidrogen com a font d'energia en el tràfic rodat. Les companyies firmaven un acord que posava en funcionament de tres estacions de servei d'hidrogen a Europa a finals de 2007, recolzant la introducció al mercat de cotxes d'hidrogen a BMW.

A Europa, el BMW 750 hL (**Figura 6**) va ser un dels primers productes d'hidrogen que es van treure al mercat. Aquest vehicle surt arrel d'un projecte I+D de la companyia a començat a principis dels 2000 amb el projecte Clean Energy.



Figura 6 - BMW 750 hL (9)

Per dissenyar l'automòbil, es va seleccionar un dels seus bucs insígnia, el 750, que comptava amb un motor molt gran (V12 benzina) i proporcionava més de 300CV, a més de tenir un gran espai. Amb les modificacions fetes al cotxe, el BMW 750hL V12 donava una potència d'entrega de 201 CV amb hidrogen en combustió, arribant a fer 9,6 segons en la prova de 0 a 100 km/h.

Tot i que aquest vehicle no fos impulsat per una pila d'hidrogen, va ser un bon primer exercici tècnic i, sobre tot, de màrqueting per la marca, ja que des d'aquest punt, BMW defèn que l'alternativa dels motors que utilitzin combustibles fòssils han de passar per l'ús de l'hidrogen.

Aquest vehicle va demostrar que la companyia era capaç de portar aquesta tecnologia al carrer i fer-la una via viable de mobilitat en el futur. Tot aquest projecte, amb data a l'any 2006 ha tingut continuïtat fins a dia d'avui, ja que a l'abril de 2020, BMW va presentar la seva proposta de mobilitat amb hidrogen, el BMW i-Hydrogen NEXT (Figura 7) utilitzant la base del seu tot terreny X5. Segons la proposta que van presentar, s'entenia que era una tecnologia amb molt camp a millorar, però que és una potencial convertidora dels motors de combustió interna. També és important afegir que, en base a la informació que ha publicat la companyia, sembla que en aquestes recents investigacions la marca està deixant de banda la idea de fer funcionar la combustió amb hidrogen i convertir els vehicles en elèctrics que absorbeixen l'energia de piles de combustible d'hidrogen.

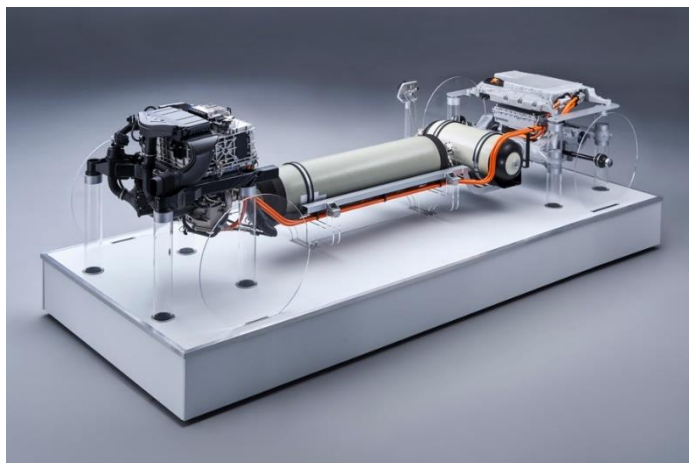


Figura 7 - El tren motriu del BMW i-Hydrogen NEXT (10)

- **Toyota FCHV**

En aquest apartat no es podia passar per alt la companyia japonesa Toyota, que sempre ha estat involucrada en l'electrificació i en l'aposta en la innovació de tecnologies propulsades per energies renovables. En 2014 va arribar a un acord de I+D junt amb BMW per desenvolupar conjuntament piles de combustible i, amb elles, crear una plataforma per implementar-les en els automòbils.

El projecte que donaria com a resultat el Toyota FCHV va néixer a finals del 1996, quan la companyia junt amb el govern japonès van decidir impulsar un projecte per analitzar la viabilitat de l'hidrogen com un possible combustible del futur i analitzar si l'aplicació al mercat automobilístic seria possible.

A partir d'aquest any, la marca va començar a dissenyar un vehicle que utilitzaria aquesta font d'energia sobre la base del seu tot terreny RAV4, que es caracteritzaria per un motor elèctric alimentat d'una pila de combustible. El cotxe consistia en una pila de combustible de 90 kW alimentada per dipòsits d'hidrogen comprimit i una bateria de níquel i hidrur metàl·lic en paral·lel. La bateria i la pila de combustible proporcionaven una potència de sortida de 90 kW tant treballant per separat, com en conjunt. El mecanisme utilitzat era molt similar al del Toyota Prius o el Toyota Auris HSD però amb una pila de combustible que substituïa al motor de combustió.

Aquesta configuració permetia circular fins a 50 km utilitzant el motor elèctric a baixes velocitats i quan se li demandava més potència al vehicle, la pila de combustible i la bateria treballaven en paral·lel per subministrar l'energia al propulsor. A més, per tal de guanyar en

eficiència, el sistema comptava amb un recuperador d'energia elèctrica durant les frenades que també permetia recuperar energia durant les frenades.

En aquest projecte Toyota va aconseguir l'objectiu, demostrar que era una font de propulsió vàlida i viable, així que la marca va decidir seguir treballant en el desenvolupament d'aquesta tecnologia creant diverses variants del mateix FCHV fins que el 2008 va presentar el FCHV-adv (**Figura 8**), que va ser el primer vehicle en llençar-se al mercat que utilitzava la pila d'hidrogen.

Aquest segon model, permetia una autonomia de més de 800 m gràcies a les seues bateries i els nous tancs d'hidrogen que muntava. A més, la pila de combustible presentava una notable millora en l'ús en temperatures extremes gràcies als nous materials que utilitzava per dur a terme la hidròlisis.



Figura 8 - Toyota FCHV-adv SUV en l'Auto Show de Washington (2010) (12)

Per entendre bé l'evolució de la marca fins arribar a l'últim model presentat, el FCHV-adv ("avançat"), cal nombrar les cinc generacions que el precedeixen, començant pels prototips preliminars FCHV-1 (1997) i el FCHV-2 (1999). E FCHV-3 es va presentar en el "Simposi internacional sobre vehicles de pila de combustible" el març de 2001, a Tokio. Fins arribar al FCHV-4, que va ser la primera versió de producció en sèrie, tot i que Toyota no va planejar el seu llançament d'aquesta tecnologia fins l'any 2015. (12)

Posteriorment la marca japonesa va seguir amb la millora de la configuració ja presentada fins arribar a models que aquesta vegada sí va poder comercialitzar. En 2015, es llença el prototip de pila de combustible FCV que era una versió molt avançada del que tenia previst llençar a partir del 2015 com a pioner en el desenvolupament d'aquest mètode de propulsió.

En paral·lel a aquest projecte, l'any 2014 la marca va llençar al mercat el primer cotxe de la indústria automotriu fabricat en sèrie i propulsat per hidrogen, el Toyota Mirai (**Figura 9**). En l'actualitat, hi ha un parc de 11.000 cotxes d'aquest model, dels quals només 1.000 es troben a Europa. (13)



Figura 9 - Toyota Mirai Segona generació (13)

A més dels fabricats i els models que s'han nombrat en aquest apartat, són diverses les marques que han apostat per la tecnologia i han creat prototips amb més o menys èxit. No es poden passar per alt la resta de marques japoneses com Honda o Hyundai, els quals van presentar el Honda FCX i el Hyundai ix35 FCEV entre d'altres. Aquestes marques junt amb algunes Alemanyes com Mercedes o BMW i, sobre tot, junt amb General Motors són les que en els últims 20 anys s'han trobat més immerses apostant i invertint en aquesta tecnologia, tot i que no es planteja la implementació a curt termini degut al limitat mercat per comercialitzar aquests vehicles i la pobre infraestructura de càrrega d'hidrogen.

Al contrari que els cotxes elèctrics a bateries, els models amb pila de combustible d'hidrogen continuen sent molt minoritaris a tots els mercats del món. Això és degut a diversos motius, des del major cost de la tecnologia i la seva menor eficiència energètica fins a una xarxa de proveïment escassa i més cara de desenvolupar.

De fet, avui dia encara hi ha menys oferta que fa uns anys: mentre que actualment només podem trobar dos models d'aquest tipus a la venda (Hyundai Nexo, Toyota Mirai), fa un parell d'anys també es fabricaven els Honda Clarity Fuel Cell i Mercedes-Benz GLC F-CELL. Tant l'un com l'altre van ser discontinuats el 2021 i el 2020 respectivament.

La immensa majoria de grups han decidit abandonar el desenvolupament de turismes amb pila de combustible, una tecnologia més adaptada al transport pesant (autobusos, camions...). Fins i tot Matt Harrison, president i director executiu de Toyota Motor Europe, va admetre recentment que el 2030 els cotxes d'hidrogen continuaran sent molt minoritaris davant dels elèctrics a bateries.

«En termes de vehicles de passatgers, no crec que la pila de combustible suposi una oportunitat significativa, honestament. Parlem d'uns quants milers d'unitats a l'any». Tot i això, Toyota continua desenvolupant aquesta i altres tecnologies; sense anar més lluny, actualment es troba testant un Corolla de competició que utilitza un motor tèrmic alimentat per hidrogen. (15) Veure L'aposta japonesa **1.6.2.3.1**.

Són molts els inconvenients als que han donat resposta els models presentats, però entre ells es troben alguns que persisteixen. Entre ells, a part de la infraestructura de càrrega i el preu de l'hidrogen verd, es troben la millora de la densitat de potencia, l'augment de seguretat del vehicle, la millora de l'autonomia, i la reducció del preu degut al poc parc que fa que la producció en sèrie sigui menys rentable i la producció de les piles d'hidrogen que a dia d'avui segueix sent costosa i necessita de materials preciosos

1.4.2. Tipus de piles de combustible

Actualment trobem una gran varietat de tipus de pila de combustible en diferents etapes de desenvolupament degut a la complexitat de la tecnologia i les seves diferents aplicacions.

Hi ha diferents tipus de pila de combustible i estan diferenciats principalment per l'electròlit que utilitzen i pel combustible, ja que no totes combustionen amb hidrogen, sinó que poden tenir altres combustibles com el dièsel, el metanol o la biomassa, mentre que acostumen a diòxid d'aire o clor com a oxidant. Malgrat trobar una gran varietat de combustibles, en aquest apartat es farà referència a les piles basades en hidrogen i oxigen. (3)

Segons l'electròlit que utilitzen, podem diferenciar 5 tipus principals de pila, resumides a la **Taula 2** i detallades en els propers apartats.

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electròlit	Membrana polimèrica sòlida	Solució alcalina	Àcid fosfòric	Carbonats fosos	Òxid sòlid
Càrregues en moviment	H+	OH-	H+	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Temperatura d'operació (°C)	60 – 80	100 – 250	150 – 250	600 – 700	800 – 1000
Eficiència elèctrica	40-60%	60-70%	35-42%	50-60%	50-60%
Rang de potència	60-80 kW	5-150 kW	50 kW – 11 MW	100 kW – 2 MW	100 – 250 kW
Avantatges	Baixa temperatura Ràpida encesa Baixa corrosió i manteniment	Major eficiència Reacció catòdica més ràpida	Accepta H ₂ impur	Reformat intern cogeneració	Reformat intern cogeneració

Aplicacions	Transport Portàtils Residencial	Missions espacials	Aplicacions estacionàries	Aplicacions industrials	Generació elèctrica distribuïda i calor
--------------------	---------------------------------------	-----------------------	------------------------------	----------------------------	---

Taula 2 - Tipus de Piles de combustible

1.4.2.1. Pila de combustible de membrana d'intercanvi de protons (PEM Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Aquesta és la pila que s'ha utilitzat més històricament en l'automoció i és el dispositiu que actualment utilitzen la majoria dels cotxes propulsats per hidrogen com el Toyota Mirai.

Són varies les avantatges que pren aquesta pila respecte de les demás. Entre elles, la pila PEM treballa a baixes temperatures, de la mateixa manera que la pila alcalina, i no fa soroll. A més de la baixa temperatura de funcionament, proporciona una gran eficiència acompanyat d'un disseny compacte, una elevada densitat de corrent, són fàcils de transportar i segures.

Per altre banda, són dispositius molt versàtils en quant a l'ús que se'ls desitgi donar, ja que segons el seu disseny, poden treballar a un ventall molt ampli de potències, des de uns pocs watts fins l'ordre de Megawatts.

Per molt que aquesta tecnologia presenti i hagi demostrat bones característiques, es segueix treballant per fer-la més eficient i, sobre tot, econòmica. Els principals objectius que es busquen assolir en l'actualitat per aquest dispositiu es basen en reduir el gruix de la capa catalítica composta per Platí i optimitzar la dispersió del catalitzador per tal d'augmentar la conductivitat iònica (i amb ella el rendiment) i abaratir els costos (disminuint la quantitat de materials preciosos).

Esquema i components

A la **Figura 10** es mostra una cel·la unitària o mono-pila és l'element bàsic d'una pila d'hidrogen i està composta per tres parts clau similars a les d'una bateria convencional:

- Elèctrodes: ànode, on es redueix el H_2 en dos protons H^+ i càtode, on reaccionen els protons H^+ i O_2 .

- Electròlit o membrana polimèrica: separa els gasos , permet el pas d'ions de H^+ al càtode i separa els e^- .
- Plaques bipolars: condueixen els gasos, evacuen el H_2O i separen les cel·les.

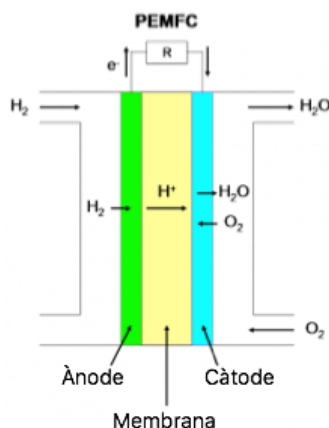


Figura 10 – Esquema de la Pila PEM (4)

Una única cel·la està composta tan sols per un ànode, un càtode i una membrana, que utilitzant l'hidrogen com a combustible seria capaç de produir 0,7 volts aproximadament. Clar està, que per moure un vehicle o alimentar un circuit elèctric per un altre ús, es necessiten voltatges més alts, és per això que a la pràctica es combinen diverses cel·les en sèrie per aconseguir el voltatge desitjat segons l'aplicació que se li vulgui donar. (5)

Materials de la cel·la unitària

Materials pila PEM	
Càtode	Platí suportat sobre carbó
Ànode	Platí suportat sobre carbó
Membrana	Nafió
Electròlit	KOH
Catalitzador	Platí

Taula 3 - Materials Pila PEM

Principi de funcionament

La tecnologia d'aquesta pila està basat en una membrana on es produeix l'intercanvi de protons. El seu electròlit està compost per una membrana d'un polímer especial que condueix els protons (H⁺) que té la particularitat de ser impermeable a la resta de substàncies.

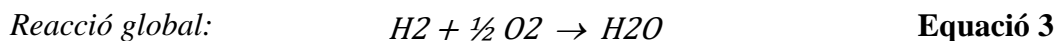
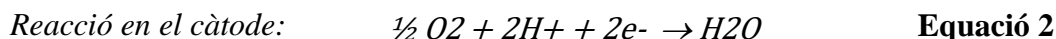
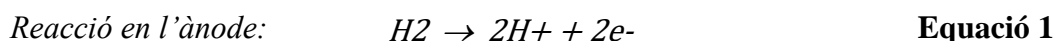
Tal i com podem veure a l'esquema simplificat de la **Figura 10**, bàsicament la cel·la està composta per 3 zones: un elèctrode carregat negativament (càtode), un elèctrode carregat positivament (ànode) i en mig una membrana electrolítica que separa físicament els gasos. L'hidrogen (combustible), s'introdueix per uns canals mecanitzats situats a les plaques bipolars per el costat de l'ànode i és guiat gràcies a una capa difusora de material carbonós fins la capa catalítica, on tindrà lloc la difusió de l'hidrogen (**Equació 1**), gràcies a la alta porositat del polímer (Nafion), els protons de l'hidrogen es separen dels electrons.

Per altre banda, la membrana polimèrica no conductora, reté els electrons i fa que no creuin cap al càtode, buscant així la sortida a través d'un circuit alternatiu: el format per les capes difusores, que sí condueixen l'electricitat, creant una corrent elèctrica aprofitable i calor, que serà evacuat gràcies al flux d'aire i a la convecció (natural o forçada) del medi que envolti la pila.

Així doncs, fent entrar un flux d'aire per la placa del càtode, els protons que han creuat la membrana es combinen amb l'oxigen a la capa catalítica produint aigua (**Equació 1**), que és evacuada a través del flux de gasos.

És evident que el funcionament descrit en aquest apartat ha estat simplificat i que a la pràctica, presenta moltes dificultats tècniques. Els dos principals problemes que presenta es redueixen a la gestió de l'aigua i el calor, ja que un defecte o excés de qualsevol de les substàncies podrien afectar al funcionament de la membrana i, per tant, de la pila. Degut a aquests inconvenients, s'ha desenvolupat una nova branca de la pila PEM capaç de treballar a altes temperatures.

Les piles **HT-PEM** són piles que gràcies a la seva composició i disposició poden operar a temperatures entre 120 i 180 °C. El fet que aquesta pila pugui operar en aquest rang de temperatures suposa moltes avantatges, sobre tot, en el circuit elèctric. Els efectes més significatius es troben en la reducció de resistència elèctrica i millora en la transferència de càrregues, entre d'altres aspectes. En conseqüència, obtenim una reacció cinètica més efectiva de la cel·la de combustible, més tensió de sortida i per tant un millor rendiment global del sistema.

Reaccions dels elèctrodes:

1.4.2.1.1 Punts de millora de la pila PEM

Tal i com s'ha esmentat en el punt anterior, aquesta és la tecnologia que més es busca millorar dins del món de l'automoció, doncs és la més aplicable a vehicles i la que actualment es comercialitza en cotxes com el Toyota Mirai.

Aquest subapartat s'ha creat arrel de la recent publicació d'un laboratori sudcoreà que promet una innovació en aquest tipus de piles per una producció a nivell industrial. El descobriment al que es fa referència va ser creat per científics de l'Institut Coreà de Ciència i Tecnologia, el Centre per a la Recerca de l'Hidrogen i Piles de Combustible, i el Departament d'Enginyeria d'Energia de la Universitat de Hangyang. Consisteix un nou tipus de membrana anomenat AEMWE (les sigles en anglès d'electrolitzadors d'aigua amb membrana d'intercanvi aniònic). Aquesta, apunten els enginyers coreans, redueix dràsticament el cost de la producció, unes 3.000 vegades més barat que les membranes actuals només al cost del catalitzador i el separador. Alhora, afirmen, aquest nou mecanisme augmenta l'efectivitat del procés d'electròlisi, multiplicant el rendiment per 1,2 i augmentant la durabilitat del mecanisme.

Per altre banda, la startup amb seu a Califòrnia, Verdagy, ha creat un sistema diferent que ja han patentat. Combina electròlisi alcalina d'aigua (AWE en les sigles en anglès) i la membrana d'intercanvi de protons (PEM), però han trobat la manera d'ampliar dràsticament la mida d'aquesta membrana. Segons explica el seu CEO Marty Neese al bloc Techcrunch, l'electròlisi alcalina d'aigua utilitza un diafragma amb un límit físic de quanta densitat de corrent pot fer servir. "Hi pot haver materials i construccions similars al que estem fent en termes de cèl·lules, però el diafragma limita la seva capacitat per córrer a densitats de corrent més altes. La membrana d'intercanvi de protons PEM té una àrea activa limitada per utilitzar.

Neese assegura que les seves “cèl·lules són molt, molt grans, i seria molt difícil replicar allò que fem. Tenim una cel·la d'arquitectura d'un sol element, cosa que significa que prens un ànode, un càtode i una membrana al mig”. El conseller delegat de Verdagy afegeix que aquesta arquitectura interior de la cel·la és la innovació patentada (pendent d'aprovació). Afirmar que la diferència amb altres solucions limitades és que la seva cèl·lula realment dissipa la calor, fa circular gas i líquid i gestiona el flux circulatori dins de la cèl·lula”. (6)

L'altre principal inconvenient en la producció d'aquestes piles són els materials preciosos, i precisament és un dels punts en els que s'estan focalitzant les empreses per millorar i poder treure molta més rendibilitat al producte. Un nou descobriment a La universitat de Cornell, podria accelerar l'ús generalitzat de les piles de combustible d'hidrogen, trobant així una alternativa als metalls preciosos.

Segons aquest recent estudi, publicat en març de 2022, un ànode de níquel cobert de carboni i dopat amb nitrogen pot catalitzar la reacció essencial de les piles de combustible reduint així la necessitat d'utilitzar aquests materials.

Aquesta investigació ha tingut lloc al laboratori Héctor D. Abrunya en la cerca de catalitzadors actius, econòmics i duradors per al seu ús en piles de combustible alcalí. Es publica ara a PNAS. "Aquesta troballa avança cap a l'ús de piles de combustible d'hidrogen netes i eficients en lloc de combustibles fòssils", va dir Abruña, professor al Departament de Química i Biologia Química de la Facultat d'Arts i Ciències. (20)

Actualment, tal i com acabem de veure a l'apartat **1.4.2.1** es necessita l'ús de materials preciosos com el platí per dur a terme les reaccions i produir electricitat, tot i que les piles alcalines **1.4.2.2** permeten l'ús de materials no preciosos en la seva membrana d'electròlit de polímer alcalí, aquestes no són tant prometedores en quant a rendiment i durabilitat.

Per superar el repte d'eliminar el platí i no substituir-lo per un altre material preciós, els investigadors van dissenyar un electrolitzador a base de níquel amb una coberta de 2 nanòmetres feta de carboni dopat amb nitrogen.

Així doncs, la pila de combustible d'hidrogen té un catalitzador d'ànode (on s'oxida l'hidrogen) que consisteix en un nucli sòlid de níquel envoltat per una capa de carboni. Quan es combina amb un càtode de cobalt-manganès (on es redueix l'oxigen), la pila de combustible d'hidrogen resultant completament lliure de metalls preciosos genera més de 200 mil·livats per centímetre quadrat.

Tal i com acabem de veure, són diversos els punts de millora a treballar en aquesta tecnologia, i precisament això és el que la fa més prometedora i fa que més companyies i grups de recerca s'impliquin en aquesta cursa per millorar la tecnologia.

1.4.2.2. Pila de combustible alcalina (AFC, Alkaline Fuel Cell)

Les piles de combustible Alcalines van ser unes de les primeres piles de combustibles que es van desenvolupar per la seva aplicació en programes espacials. Els Estats Units utilitzaven aquesta tecnologia per produir energia elèctrica i aigua a bord de les naus espacials al voltant dels anys seixanta i va ser una de les tecnologies que van permetre a l'home arribar a la lluna. Aquestes piles de combustible utilitzen una solució d'hidròxid de potassi en aigua com a electròlit i poden utilitzar una gran varietat de metalls no preciosos com a catalitzadors, tant en l'ànode com en el càtode. Poden treballar en temperatures entre 100 i 250°C tot i que s'han desenvolupat dissenys més recents capaços de treballar a temperatures entre 23 i 70°C. Estructuralment, la pila AFC és similar a les cel·les de combustible PEM vistes en l'apartat anterior. Està composta per diversos catalitzadors com l'or, níquel, platí o òxids metàl·lics, però la principal diferència entre les dues piles la trobem en la membrana, ja que aquesta és una membrana d'intercanvi d'anions en comptes de protons.

Entre les avantatges tornem a tenir les temperatures de treball, ja que normalment treballen per sota dels 150°C podent arribar a rangs d'entre 23 i 70°C. Proporcionen un alt rendiment elèctric degut a la velocitat de les reaccions que són capaces de produir, fet que les fa tenir una gran eficiència i aconseguir valors al voltant de 60% de rendiment. A més, és una de les piles més barates de produir ja que els catalitzadors que requereixen els elèctrodes poden ser de tipus molt variat i no necessàriament de materials preciosos.

Per altre banda, com a inconvenients trobem que aquestes piles són molt sensibles a la contaminació per diòxid de carboni, tant és així, que una petita quantitat de CO₂ pot afectar al funcionament del dispositiu. Per corregir-ho, es segueix un procés de purificació de l'oxigen i l'hidrogen utilitzats i aquest fet, junt a la sensibilitat que presenten davant aquests tipus de contaminació, fan incrementar el cost de la tecnologia.

Esquema i components

A la **Figura 11** es mostren els components de la pila alcalina són molt similars als de la pila PEM, diferenciant-se pels materials utilitzats i pel propi funcionament.

- Catalitzadors: diversitat de materials no preciosos.
- Circuit elèctric: on s'aprofita l'energia elèctrica i es connecta amb la resta de cel·les.
- Elèctrodes: ànode, on es duu a terme la reacció i càtode, on es fa entrar l'oxidant.
- Electròlit: separa els gasos, permet el pas d'anions.
- Plaques bipolars: condueixen els gasos, evacuen el H₂O i separen les cel·les.

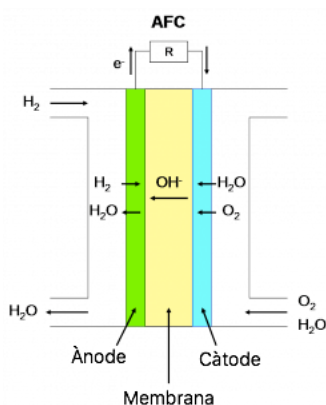


Figura 11 - Esquema de la pila AFC (4)

De la mateixa manera que les piles PEM, els dispositius de piles alcalines també es basen en l'apilament de cel·les unitàries per tal d'obtenir la tensió elèctrica desitjada.

Materials de la cel·la unitària

Materials pila AFC	
Càtode	Níquel, Plata, Òxids metàl·lics
Ànode	Níquel, Plata, Òxids metàl·lics
Matriu	Mineral
Electròlit	Hidròxid de Potassi (KOH)

Taula 4 - Materials pila AFC

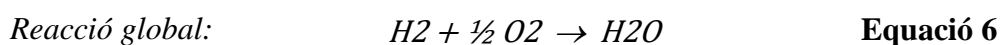
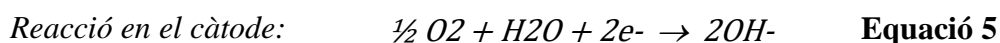
Principi de funcionament

Aquesta pila produeix electricitat gràcies a fer una reacció redox entre l'hidrogen i l'oxigen en l'ànode (**Equació 4**). Amb aquesta reacció, l'hidrogen s'oxida produint aigua i alliberant 2 electrons, els quals flueixen a través d'un circuit extern i tornen al càtode, on reduiran l'oxigen segons l'Equació 5 i s'obtidran ions d'hidròxid.

La reacció global simplificada (**Equació 6**), consumeix mitja molècula d'oxigen i una d'hidrogen per produir una molècules d'aigua, calor i electricitat.

Tant el carburant com el combustible que utilitza la pila alcalina han de ser hidrogen i oxigen purs. En cas que partícules de CO₂ o CO reaccionessin amb el KOH, es formaria carbonat potàssic i reduiria de manera dràstica el funcionament de la pila. Inclús en petites dosis de monòxid o diòxid de carboni, es produiria aquest enverinament de la pila.

Reaccions



1.4.2.3. Pila de combustible d'àcid fosfòric (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell)

Les piles d'àcid fosfòric utilitzen aquest concentrat com a electròlit retint en una matriu de carbur de silici a unes temperatures d'operació que oscil·len entre els 150 i 250°C. L'electròlit és àcid fosfòric pur i el catalitzador tant en l'ànode com en el càtode és platí, el mateix material preciós que trobem a la pila PEM. De fet, aquests dos dispositius tenen el mateix principi bàsic de funcionament, amb la diferència que la pila PAFC opera al voltant dels 200°C, el que la fa més susceptible a les impureses i requereixen una unitat de reforma externa.

Les eficiències poden arribar fins a un 80% en el cas de cogeneració d'energia elèctrica per vapor d'aigua. A temperatures baixes, l'àcid fosfòric té pobres capacitats conductores i, a més, presenta una alta sensibilitat davant la contaminació de CO del platí en l'ànode. L'alta

estabilitat relativa d'aquest àcid, afavoreix el treball en un ampli rang de temperatures i facilita el tractament de l'aigua generada per la reacció.

Aquesta tecnologia presenta una tolerància a contaminants generats en el procés de reformat d'hidrocarburs força superior a la resta, pel que la fa una pila molt competent envers de les altres piles que treballen a baixes temperatures.

Per altre banda, com a inconvenients trobem la alta sensibilitat a impureses compostes per CO, l'elevat cost degut als catalitzadors de platí i la naturalesa corrosiva de l'electròlit, que limita molt l'elecció de materials. (7) També trobem que perden molta eficiència quan només generen energia elèctrica (37-42%) i produeixen menys energia que altres piles a igualtats de pes i volum.

Esquema i components

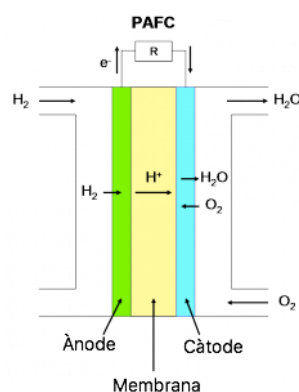


Figura 12 - Esquema de la pila PAFC (4)

- Elèctrodes: ànode, on es redueix el H_2 en dos protons H^+ i càtode, on reaccionen els protons H^+ i O_2 .
- Circuit elèctric: on s'aprofita l'energia elèctrica i es connecta amb la resta de cel·les.
- Electròlit: separa els gasos, permet el pas de ions de H^+ al càtode i separa els e^- .
- Plaques bipolars: condueixen els gasos, evacuen el H_2O i separen les cel·les.

Materials de la cel·la unitària

Materials pila PAFC	
Càtode	Platí suportat sobre carbó
Ànode	Platí suportat sobre carbó
Matriu	Composta de SiC empolvorada amb PTFE
Electròlit	Àcid fosfòric
Separadors	Carbó vitri o polímer de carbó

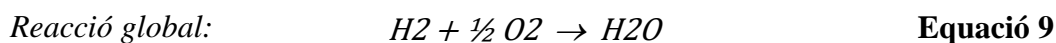
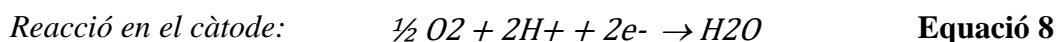
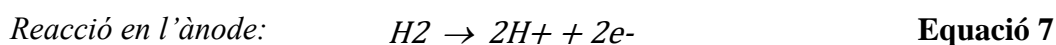
Taula 5 - Materials pila PAFC

Principi de funcionament

En les piles d'àcid fosfòric, l'hidrogen (H_2) penetra per l'elèctrode negatiu (ànode) i gràcies al catalitzador es separa en ions positius H^+ i electrons (**Equació 7**). L'oxigen (O_2) procedent de l'aire penetra per l'altre elèctrode, el càtode, i es separa de la mateixa manera en entrar en contacte amb el catalitzador en ions de O_2^- . Els ions positius de l'hidrogen s'escapen gràcies a l'electròlit i en direcció al càtode, deixant electrons lliures en l'ànode que són els que produiran electricitat.

Per tant, fàcilment arribem a la conclusió que aquesta pila té el mateix funcionament que una pila PEM, diferenciant-se per l'electròlit, comportament i rang de temperatures.

Reaccions



1.4.2.4. Pila de combustible de carbonat fos (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell)

La pila de combustible de carbonat fos va començar a ser desenvolupada al llarg de la dècada dels seixanta, amb l'objectiu de poder fer una pila capaç de treballar amb combustibles fòssils que tenien a l'abast en aquella època com el carbó.

En aquest tipus de piles de combustible, la conversió del combustible a hidrogen es realitza a l'interior de la pròpia pila, aprofitant que les piles MC no són propenses a la contaminació per CO o CO₂, poden ser alimentades amb gasos provinents del carbó.

El seu comportament es basa en l'alta conductivitat iònica que proporcionen les sals a altes temperatures, permetent així reduir costos en materials preciosos que són capaços de proporcionar aquesta conductivitat en temperatures més baixes.

Entre els inconvenients, trobem que aquests dispositius treballen a rangs de temperatura d'entre 600 i 700°C, fet que la fa força ineficient si no treballa amb cogeneració i això sumat al caràcter corrosiu de l'electròlit fan que tinguin problemes de durabilitat.

Les piles de carbonat fos troben les seves aplicacions en plantes de generació de 2MW, havent-se arribat dissenyar per subministrar fins a potències al voltant de 100MW.

Esquema i components de la pila MCFC

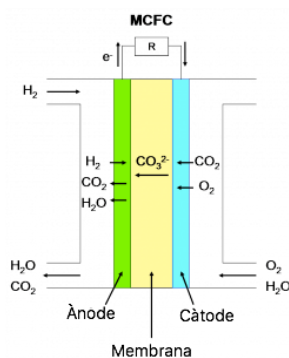


Figura 13 – Esquema de la Pila MCFC (4)

- Electròlit: carbonats alcalins sobre una matriu ceràmica transfereixen el ió carbonat fins l'ànode.
- Circuit elèctric: on s'aprofita l'energia elèctrica i es connecta amb la resta de cel·les.
- Elèctrodes: càtode, on s'insereix O₂ i CO₂ i ànode, on s'oxida l'hidrogen i s'expulsa el CO₂ i aigua.
- Plaques bipolars: condueixen els gasos, separen les cel·les i evacuen el H₂O i reconduïxen el CO₂ a través d'un circuit tancat per ser reutilitzat.

Materials de la cel·la unitària

Degut a les altes temperatures de funcionament, no són necessaris metalls nobles en els elèctrodes ja que a aquestes temperatures les cinètiques de reacció milloren notablement.

Materials pila MCFC	
Càtode	Metalls no nobles (Ni amb CR o Al, o òxids metàl·lics)
Ànode	Metalls no nobles (Ni amb CR o Al, o òxids metàl·lics)
Matriu	LiAlO ₃ (ceràmica)
Electròlit	Carbonat fos

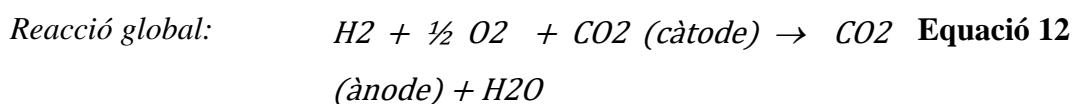
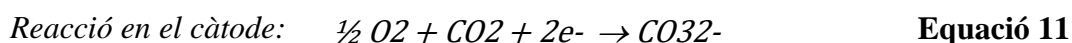
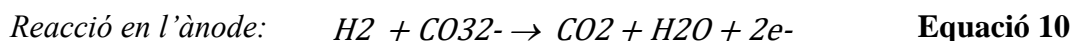
Taula 6 - Materials de la pila MCFC

Principi de funcionament

En les piles de combustible MC és produeix la reacció entre el H⁺ i els ions de CO₃⁻ de l'electròlit en l'ànode, donant com a producte de la reacció CO₂, H₂O i la alliberació de e⁻ (**Equació 10**). Aquest electró és atret per un conductor i dirigit a un circuit tancat per tal de produir electricitat i tornar al càtode per reaccionar de nou.

En el càtode es combina el O₂ i el CO₂ i els electrons que han circulat pel circuit extern, produint de nou ions de carbonat (CO₃⁻) que s'uniran a l'electròlit de nou (**Equació 11**).

Reaccions



1.4.2.5. Pila de combustible d'òxid sòlid (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell)

Aquest tipus de pila utilitza electròlits i elèctrodes en estat sòlid i presenten una avantatge davant de la resta de piles: la versatilitat del combustible i l'oxidant.

Les piles SOFC es basen en la capacitat de certs òxids de transportar els ions d'òxid a temperatures elevades (entre 600-1000°C), aconseguint eficiències en cogeneració de fins a un 85%. Gràcies a aquesta alta temperatura de treball, no necessiten combustibles d'alta puresa i inclús poden utilitzar barreges.

És una cel·la de combustible que promet molt de cara al futur, utilitzable en aplicacions d'elevats rangs de potència com generadors d'energia elèctrica o implementacions industrials. Les investigacions en millorar aquesta tecnologia es basen en reduir el gruix de la capa de l'electròlit i en la busca de nous materials amb conductivitat iònica a baixa temperatura.

Entre les avantatges trobem la versatilitat de combustibles utilitzables (hidrocarburs), i un sistema combinat per la generació d'hidrogen, energia i refrigeració o calefacció. Per altre banda, com a inconvenients trobem els mateixos que altres piles que treballen a altes temperatures, la degradació dels components degut a la corrosió i la limitació en l'elecció de materials (que encareix el producte) a més d'un major temps d'arrancada.

Esquema i components de la pila SOFC

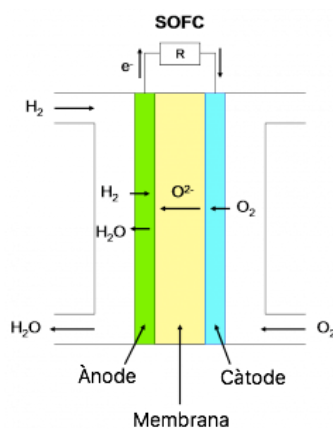


Figura 14 - Esquema de la pila SOFC (4)

- Elèctrodes: ànode, capa ceràmica porosa que permet que el combustible reaccioni i càtode, fina capa porosa on es redueix l'oxigen.
- Circuit elèctric: on s'aprofita l'energia elèctrica i es connecta amb la resta de cel·les.
- Electròlit: d'òxid metàl·lic, separa els gasos i permet el pas de O²⁻ a l'ànode.
- Plaques bipolars: condueixen els gasos, evacuen el H₂O i separen les cel·les.

- Cremador: escalfa l'*stack* fins la temperatura de funcionament.
- Sistema de refrigeració: la pila ha d'estar refrigerada en tot moment per evitar sobreescalfaments.

Materials de la cel·la unitària

Igual que a les piles MCFC, segut a les elevades temperatures no és necessari implementar metalls nobles per accelerar les reaccions electroquímiques. En aquest cas les parts es construiran de tal manera que hi haurà dos elèctrodes porosos formant una espècie de Sandwich amb l'electròlit sòlid.

Materials pila SOFC	
Càtode	LaMnO ₃ + Si
Ànode	Co-ZrO ₂ / Ni-ZrO ₂
Electròlit	Òxid metàl·lic no porós o sòlid ceràmic

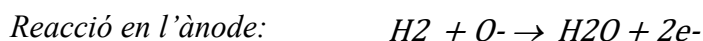
Taula 7 - Materials de la pila SOFC

Principi de funcionament

La pila de combustible d'òxid sòlid es compon de quatre capes principals, tres de les quals estan fetes de materials ceràmics. Les capes ceràmiques que componen el dispositiu no s'activen elèctricament fins que no arriben a altes temperatures i en conseqüència, han d'operar en temperatures que van des de els 600 fins als 1000 °C.

En el càtode es produeix la reducció de l'oxigen en ions (**Equació 14**). Aquests ions viatgen a través de l'electròlit d'òxid sòlid fins l'ànode, on s'oxidarà el combustible (H) electroquímicament. En conseqüència d'aquesta reacció en l'ànode, es produirà l'aigua i dos electrons (**Equació 13**), que fluiran a través d'un circuit extern per tal d'extreure el treball.

Reaccions



Equació 13



Equació 14



Equació 15

1.5. Aplicació de la pila de combustible en vehicles elèctrics

Tal i com s'ha esmentat en l'apartat **1.4.1.1**, les piles de combustible estan dissenyades per ser una manera alternativa de produir electricitat. Per ser emprades en l'automoció, aquestes estan dissenyades per ser aplicades a vehicles elèctrics purs, per generar l'energia necessària per moure les màquines elèctriques.

D'entre els diferents tipus de piles tractats en els apartats anteriors, per un vehicle d'hidrogen la millor pila a utilitzar en l'actualitat seria la pila PEM. Aquestes piles a més de tenir una mida raonable i produir una bona relació potència-volum, funcionen a una baixa temperatura d'operació, fet que permet que els vehicles puguis engegar ràpidament sense inconvenients i tingui una resposta immediata a les variacions de demanda energètica del motor, molt habituals durant la conducció.

En l'actualitat s'està aplicant cada cop més l'ús de les piles en vehicles de grans mides com ara cotxes o autobusos, i és que aquests vehicles tenen molt més espai per emmagatzemar l'hidrogen. Aquest és un dels principals reptes a ser resolts en els vehicles lleugers, ja que l'hidrogen en estat gasós ocupa molt espai. 1 kg d'hidrogen gasós, a 200-350 bars de pressió ocupa aproximadament un volum de 60 litres i si es volgués emmagatzemar a pressió atmosfèrica, es necessitaria un tanc de 11.000 litres de capacitat. (21)

No obstant, a més pressió més massa d'hidrogen es pot transportar i actualment s'estan desenvolupant nous sistemes d'emmagatzematge que permeten arribar a pressions de més de 250 bars amb total seguretat, de manera que es fa possible l'emmagatzematge de quantitats més grans d'hidrogen que repercutiran en l'autonomia del vehicle.

En definitiva, el que pot aportar l'ús d'aquesta tecnologia en automoció és la gran eficiència energètica que ofereixen les piles de combustible. Això permet als vehicles poder recórrer més distància fent servir una menor quantitat de combustible que un vehicle tradicional amb motor de combustió. De fet, proves realitzades amb vehicles reals propulsats amb hidrogen han demostrat que 1 kg d'hidrogen proporciona prou energia per recórrer entre 100-150 km en un vehicle lleuger, tipus turisme, del que es dedueix que, a igualtat de massa, el hidrogen resulta insuperable davant d'un altre combustible. (21)

A diferència d'un cotxe elèctric, els cotxes amb pila de combustible no es carreguen mitjançant un endoll, sinó disposa de tanc d'hidrogen que barrejant el gas amb oxigen per generar la propulsió de l'automòbil.

El procés electroquímic resultant de fer aquesta barreja es produeix a la pila de combustible i aquesta és la que genera energia elèctrica i aigua, mentre que l'energia sobrant s'emmagatzema a les bateries per alimentar al motor.

Així doncs, el procediment de manera esquematitzada és el següent:

1. S'emmagatzema hidrogen als tancs per abastir a la pila.
2. S'injecta aire (oxigen) a les cel·les de combustible que conformen la pila.
3. La reacció d'oxigen i hidrogen genera electricitat i aigua.
4. L'electricitat produïda alimenta la bateria i aquesta abasteix al motor.
5. S'expulsa el residu (aigua) pels tubs d'escapament.

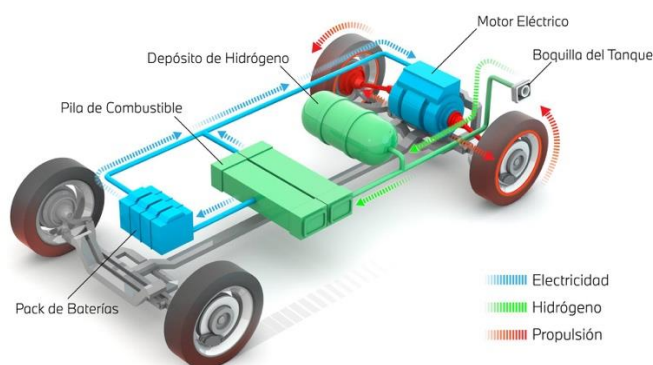


Figura 15 - Esquema de funcionament cotxe amb pila de combustible. Font: BMW

1.5.1. Components d'un cotxe de pila de combustible

Els cotxes que porten sistema de pila d'hidrogen, han de comptar amb un gran nombre de sistemes auxiliats per augmentar l'eficiència creant unes condicions òptimes per afavorir la reacció electroquímica que es du a terme.

En els propers apartats, es faran contínues referències a la tecnologia que utilitza el Toyota Mirai de segona generació, doncs és un model molt provat i millorat respecte el seu antecessor.

A continuació, es nombren els diferents components bàsics que ha de tenir una pila de combustible per funcionar en un vehicle:

1. **Unitat de control de l'energia.** És el mecanisme per controlar de manera òptima la potència de la pila de combustible en les diferents etapes de funcionament, així com la càrrega i descàrrega de la bateria.
2. **Convertidor de voltatge de la pila de combustible.** Convertidor d'alta eficiència i capacitat que té com a funció augmentar la potència generada pel sistema de pila de combustible fins els 650 Volts. S'utilitza per obtenir una major tensió a la sortida que a l'entrada i alimentar a la bateria amb el voltatge adient.
3. **Bateria.** Bateries normalment de liti-metall o ió-níquel que s'encarreguen d'emmagatzemar l'energia recuperada de la desacceleració i reforça la potència de la pila de combustible durant l'acceleració.
4. **Tancs de combustible.** Són dipòsits d'alta pressió i s'encarreguen d'emmagatzemar l'hidrogen com a combustible a pressions nominals de 70 MPa (700 bars). Els dipòsits són compactes i lleugers i compten amb una densitat d'emmagatzematge màxima (5,7% de pes).
5. **Bloc de la pila de combustible.** Piles de combustible de tipus PEM amb un disseny compacte i una màxima densitat energètica. En el cas del Toyota Mirai, aquesta densitat energètica per volum és de 3,1 kW/L, oferint una potència màxima de 114 kW, l'equivalent a 155 CV.
6. **Motor elèctric.** És l'encarregat de donar l'energia cinètica necessària segons la demanda del conductor. Motor impulsat per l'electricitat generada per la pila de combustible i la bateria. En el cas del Toyota Mirai, produeix una potència màxima de 113 kW (154 CV) i un moment màxim de 335 Nm. Normalment aquesta potència i parell màxim és regulat per la unitat de control per reduir-la i obtenir una millor autonomia.

Alguns sistemes auxiliars que componen el sistema de pila de combustible són els següents:

7. Sistema de gestió d'hidratació de la membrana.
8. Intercanviador del sistema de refrigeració. Normalment són dos circuits independents, un per refrigerar la màquina elèctrica i l'altre per refrigerar la cel·la de la pila.
9. Sistema de preescalfament.
10. Sistema de compressió de l'aire d'entrada a la pila.
11. Sistema de gestió de subproductes a la sortida.
12. Bateria de condensadors.
13. Suport de les cel·les de la pila.

1.5.1.1. Emmagatzematge del combustible

L'emmagatzematge de l'hidrogen és un dels temes més delicats que envolten a la pila de combustible. És normal el pensar que portar tancs de gas inflamable comprimit a pressions molt elevades pot suposar un perill pels ocupants del vehicle en cas de col·lisió, però de la mateixa manera que els altres combustibles fòssils, els tancs d'hidrogen han de complir les normatives marcades. Un altre dels perills que la gent pot pensar que comporta un tanc d'hidrogen a alta pressió és la possibilitat de detonació. Aquest no deixa de ser un perill real, però que només seria possible sota unes condicions molt específiques, s'hauria d'acumular en un espai gran una important quantitat d'hidrogen i donar-se una sèrie de condicions que són molt poc provable que s'esdevinguin en un vehicle.

El fet de transportar gas a un vehicle presenta moltes més dificultats que el transport d'altres combustibles fòssils. Degut a la baixa densitat de l'hidrogen, els fabricants es veuen obligats a dissenyar grans tancs que suportin elevades pressions, així com sistemes complexos per poder comprimir l'hidrogen i fer cabre més quantitat en un mateix volum, donant així una millor autonomia al vehicle.

Actualment hi ha diversos estudis i empreses involucrades en l'optimització del transport i emmagatzematge del gas. Alguns dels principals punts que tracten aquestes investigacions, són les altes pressions, temperatures criogèniques, hidrogen líquid, emmagatzematge sòlid o emmagatzematge mitjançant materials, ja sigui per enllaços químics o fisorció. En la **Figura 16** es detallen els resultats d'aplicar els diferents mètodes d'emmagatzematge en funció dels rangs de pressió i temperatura que s'aconsella per cadascuna d'aquestes. Com es

pot comprovar, en la compressió del gas es marca una línia als 700 bars i 288K (temperatura ambient), mentre que per l'hidrogen líquid la pressió és molt més baixa.

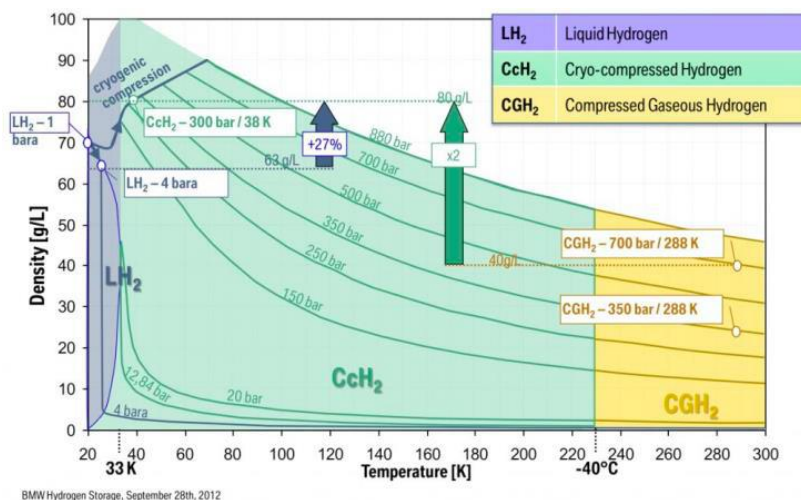
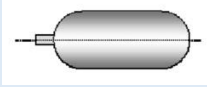
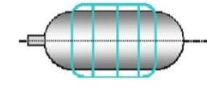
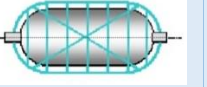
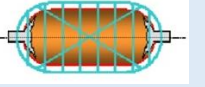


Figura 16 - Propietats de l'H2 en funció de pressió i temperatura. Font: D. Enrique Calleja Ramos

Fins ara, tots els vehicles que s'han comercialitzat o presentat comptaven amb emmagatzematge físic en forma de tancs (**Figura 17**). Aquests tancs es basen en l'emmagatzematge de molècules de H₂ lliures sense que aquestes s'uneixin les unes amb les altres o siguin combinades amb altres materials.

Es poden distingir 4 tipus funcionals de tancs, que es diferencien principalment per la resistència estructural que presenten.

	Tipus 1	Tipus 2	Tipus 3	Tipus 4
				
Materials	Acer, Alumini	Acer, Alumini, Compòsits	Acer, Alumini, Compòsits	Polietilè, fibra de carboni
Pressió de treball (bar)	175 - 200	700 - 1000	500 - 700	< 700
Característiques		Normalment reforçades amb materials compostos de	Compten amb un forro metàl·lic intern per evitar	Forro intern de material plàstic. Reforç extern de fibra de carboni

		fibra de carboni o vidre	fugues. Els més resistents són els de fibra de carboni	en diferents direccions
Avantatges	Sense costures i econòmics	Sense costures	Millor capacitat gravimètrica	Lleuger, molt resistent, alta capacitat gravimètrica
Desavantatges	Pesats, parets gruixudes, baixa capacitat gravimètrica	Pesats	Costosos	Molt costosos, permeabilitat de la membrana
Aplicacions	Estacionàries	Estacionàries, dipòsits en hidrogeneres	Estacionàries, dipòsits de vehicles pesats	Transport i estacionàries

Taula 8 - Tipus de tancs de combustible. Taula de creació pròpia

Tal i com s'ha vist a la **Taula 8**, les alternatives més adequades per l'emmagatzematge d'hidrogen en l'automoció, són clarament les tipus 3 i 4, per motius de pes, resistència i altes pressions que permeten major quantitat de gas.

En la figura 19 podem comprovar el gruix del tanc que comercialitza Toyota, aquest està reforçat amb una capa de fibra de carboni i comparteix les propietats esmentades a la **Taula 8**, tipus 4. De fet, a banda de les proves a les que es sotmet aquests tancs, el president executiu de Toyota, Bob Carter, amb la fi de demostrar que el seu producte és segur, en una recent conferència de premsa en motiu del Automotive New World Congress el president va declarar haver efectuat disparats contra un dels seus tancs d'hidrogen i que aquest els havia suportat. Segons les seves declaracions, les bales disparades amb una pistola de petit calibre rebotaven sobre el tanc de fibra de carboni, mentre que les bales de calibre 50 amb prou feines aconseguien abonyegar-lo.



Figura 17 - Tanc d'hidrogen Toyota Mirai

Tal i com s'ha esmentat, un dels principals reptes dels enginyers a l'hora de dissenyar un cotxe impulsat per pila d'hidrogen i que ha de comptar amb dos tancs de combustible, és l'arquitectura que han de tenir per allotjar els tancs sense restar, en accés, l'espai de l'interior. L'arquitectura del Mirai 2020 (segona generació) s'ha canviat per complert. Tal i com veiem a la **Figura 18**, els ocupants davanters ja no van asseguts sobre la pila de combustible, que ara s'allotja sota el capó davanter, el que li proporciona més habitabilitat tot i tenir menys alçada. En aquesta reestructuració de components, el nou Toyota té la pila de combustible a la part frontal del cotxe, ja que al tenir tracció al darrera i no davantera com la primera generació, la màquina elèctrica no resta espai i permet muntar la pila sota del capó, habilitant així un espai sota de l'habitable del vehicle per allotjar un gran tanc d'hidrogen longitudinalment.

D'aquesta manera els japonesos aconsegueixen aprofitar millor l'espai de l'habitacle i una major eficiència entre eixos (292 cm), 14 cm més que abans. Com a resultat, el Mirai de segona generació deixa de ser un quatre places i n'ofereix 5, tal i com fan els seus competidors Honda FCX o el Hyundai Nexó.

Toyota presumeix d'haver aconseguit fins a un 6% del pes dels dipòsits sigui útil, cosa que suggereix que el conjunt dels dipòsits pesarà estant buits el mateix que abans -uns 87,7 quilos-, 93 kg quan estan plens. Amb això, l'autonomia del Toyota Mirai 2021 ha crescut un 30% i arriba als 650 km, amb un temps de recàrrega dels seus dipòsits que no supera els 5 minuts.

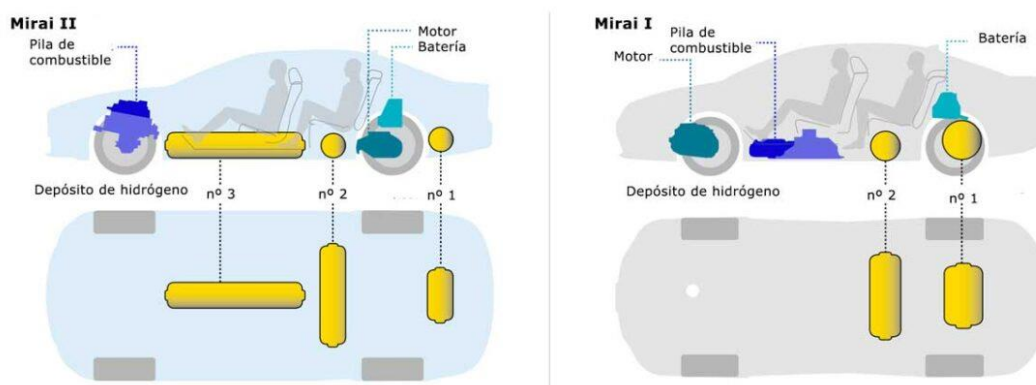


Figura 18 - Comparativa tancs d'hidrogen Toyota Mirai (23)

1.5.1.2. Unitat de control

La unitat de control o control de cel·les CCU (Cell Control Unit) és un sistema electrònic que s'encarrega de gestionar la producció elèctrica que es duu a terme en una cel·la en funció de les necessitats del sistema en cada precís moment. Conceptualment, el CCU treballa com les ECU dels motors de combustió interna, regulant el caudal d'entrada del combustible en funció de la resta de paràmetres que afecten al sistema, com la temperatura de la pila, pressió d'alimentació o temperatura ambiental.

Com tota unitat de control, aquesta necessita una sèrie d'entrades que enviïn senyals d'informació per tal de gestionar el funcionament de la pila. Les entrades bàsiques són les següents:

- Sonda de temperatura ambient.
- Sonda de temperatura interna de la pila.
- Sonda d'hidratació de la pila

I les sortides són:

- Activació del sistema de preescalfament.
- Vàlvula reguladora del caudal de l'oxidant.
- Vàlvula reguladora del caudal de combustible.

Aquestes són les entrades i sortides bàsiques per el funcionament d'una pila, però clar està que les unitats de control que porten models com el Toyota Mirai són més complexes i tenen

més senyals d'entrada que els permet rebre més informació del vehicle i afinar la regulació dels paràmetres en funció de la demanda de la conducció.

La seva funció es basa en la continuada presa de dades del sistema i de l'ambient que l'envolta, amb el propòsit de regular l'entrada de combustible i aire per aconseguir la major eficiència en la reacció possible. Per altre banda també gestionen altres subsistemes del vehicle com ara el de preescalfament o sobrealimentació o refrigeració. Aquestes unitats de control presenten 3 principals estats o modes de funcionament: arrancada, operació i apagat. La CCU combina aquest 3 estats per optimitzar el rendiment i cuidar la salut de la pila.

1.5.1.3. Cel·les de potència

Les cel·les de potència són l'element indispensable dins de la pila de combustible, ja que són les encarregades de dur a terme la reacció química per convertir l'energia de la reacció en electricitat. Aquest és l'element clau a l'hora de determinar part de l'eficiència del sistema i seran crucials a l'hora d'aconseguir un bon resultat de la pila.

En aquest apartat, i tal i com s'ha detallat en el punt **1.4.2.1.1**, la pila escollida utilitza la tecnologia PEM ja que és la que més s'adapta en quant a condicions de funcionament, en concret, s'ha escollit la pila del **Toyota Mirai de segona generació**, doncs es tracta d'una pila PEM molt provada i amb millores respecte l'anterior.

La pila de membrana de polímer, funciona a 650 V, com abans. Continua sent una referència en densitat energètica alhora de convertir energia. Els 128 kW que proporciona 14 kW més, equivalent a uns 20 cavalls més que abans, s'obtenen d'una pila que pesa 25,5 quilos, abans era de 28,4 kg, això condueix a una relació de 5 kW/kg.

També presenta un rècord en volum, amb 5,4 kW/litre que es veu reflectit en la reducció de la mida, ja que ocupa només 24 litres en lloc de 33 litres. La reducció de pes aconseguida a la pila és d'un 11%, igual que el nombre de cel·les de la pila s'ha reduït de 370 a 330, cadascuna d'elles un 20% més prima que abans.

Per descomptat, tots els perifèrics necessaris per al seu funcionament existeixen i es poden tenir en compte, però no treu mèrit a la densitat energètica de la pila en si. Altres tecnologies de propulsió porten bateries o dipòsits grans a causa del seu elevat consum. Un motor de gasolina d'un Fórmula Un estava entre 7 i 8,2 kW/kg, però un Wankel (**1.6.1**), considerat de gran relació pes-potència, ronda els 1,5 kW/kg. (23)

1.5.1.4. L'equip elèctric

L'estructura d'un vehicle amb pila d'hidrogen és pràcticament igual que un vehicle elèctric. L'equip elèctric, sobre tot, depèn de la disposició de les màquines elèctriques, ja que existeixen diferents disposicions del tren de potència en funció d'on situen els motors: un motor a cada roda (4 màquines), tracció total amb motors a l'eix (2 màquines) o tracció davantera/del darrera (1 màquina).

En aquest cas s'escull una propulsió amb una màquina elèctrica al darrera, tal i com es veu a la **Figura 19** amb el Toyota Mirai 2020, que trenca amb la rutina del motor davanter i imposa una tracció al darrera que el permet guanyar espai a la part davantera on situa la pila de combustible. D'aquesta manera, es simplifica el sistema de gestió de potència i complicacions mecàniques (a més motors més possibles averies) i es redueixen el número de components mecànics que formen part del sistema de transmissió de potència, reduint en el pes i el preu i simplificant el sistema elèctric.



Figura 19 - Disposició d'elements del Toyota Mirai 2020 (23)

- **El motor**

Seleccionar el motor o els motors a emprar en un cotxe elèctric depèn fonamentalment de la massa del vehicle i de l'acceleració que es vulgui aconseguir. Algunes de les característiques que han de complir aquests motors són les següents:

- Facilitat de control
- Tolerància a fallades
- Alta eficiència

- Alta potència a alta velocitat
- Alta densitat de potència
- Elevat moment a baixa velocitat
- Zona d'operació constant estesa
- Baix nivell de soroll i baixa interferència electromagnètica (EMI)

El disseny del motor elèctric hauria d'estar optimitzat perquè l'energia cinètica del vehicle generi la màxima quantitat d'energia possible durant les fases de regeneració i perquè l'energia emmagatzemada a la bateria pugui ser lliurada a les rodes el més eficientment possible.

Actualment, hi ha tres tipus de motors elèctrics emprats en automoció que compleixen tots els requisits: els motors d'inducció, els motors d'imants permanents i els motors síncrons de reluctància.

Tal i com s'ha esmentat a l'encapçalament de l'apartat, en el cas del Mirai II compte amb un sistema de potència de tipus síncron d'imant permanent del nou Toyota Mirai és impulsat per l'electricitat generada per la pila de combustible i subministrada per la bateria. Obté com a resultat del sistema una potència de 182 CV (128 kW) amb un moment màxim de 300 NM i una entrega pràcticament instantània del pic màxim de potència.

Les principals avantatges dels motors d'imants permanents és que són petits, lleugers, silenciosos i molt eficients a baixes rpm. Per contra, aquestes màquines tenen un alt cost i el risc de desmagnetitzar-se amb el temps, a més, necessiten de sistemes auxiliars com el sensor de posició i controladors electrònics.

- **La bateria d'acumulació**

És necessària una bateria d'acumulació que sigui capaç d'emmagatzemar l'energia que ve de la pila de combustible en aquells moments en els que no tota l'energia produïda per la pila sigui demandada per la conducció. Aquesta bateria també es recarrega quan el motor elèctric es troba en fase de retenció i recupera l'energia cinètica del moviment del vehicle en les frenades.

El Mirai 2020 continua sent un híbrid, ja que incorpora també una bateria a més de la pila de combustible que l'alimenta. Aquest abandona la de NiMH a favor d'una d'ions de liti (**Figura 20**), amb un pes de 44,6 quilos, ara emmagatzema un 32% menys d'energia, 4Ah, 1,24 kWh en lloc d'1,59 kWh fet que redueix el volum de la bateria i deixa com a resultat

més capacitat al maleter (**Figura 18**). De la mateixa manera que feia la primera generació, la bateria del Mirai va refrigerada amb aire pres de l'habitacle.

El fet que el Mirai 2020 tingui menys capacitat d'emmagatzematge elèctric ho recupera amb un augment de potència al motor elèctric, i de fet, treballa a un voltatge superior, de 310 V en lloc de 244,8 V, i si és així, la potència amb que pot donar suport a la pila de combustible és un 20 per cent més gran. Si abans era de 25,5 kW, la bateria del Mirai II subministra fins a 31,5 kW. Amb el suport, el motor d'imants permanents pot desplegar més potència que l'aportada per la pila de combustible. El motor anuncia 134 kW (182 CV) a 6.940 rpm. De la mateixa manera, també pot recuperar amb una frenada regenerativa un 20 per cent més intens, el que li permet recarregar la bateria 0,2 vegades més ràpid en regeneració i l'ajuda a complir amb els major nombre de cicle de càrrega que necessita la nova bateria. (23)



Figura 20 - Bateria ió-liti Mirai II. Fuente: Toyota

- **Convertidor DC/AC**

Aquest és un dels elements essencials del sistema. Es tracta d'un convertidor compacte d'alta eficiència i gran capacitat alimentat per corrent trifàsic que augmenta la diferència de potencial generada pel sistema de pila de combustible fins als 650 volts. S'utilitza per obtenir més tensió a la sortida que a l'entrada i és l'encarregat de subministrar l'energia a cadascun dels elements que forma el sistema i que treballen amb diferents tensions elèctriques. Per poder gestionar el funcionament dels components, aquest ha de ser capaç de convertir la corrent de contínua (bateria, pila de combustible i elements auxiliars de 12V) a alterna (motor trifàsic) i al revés en cas d'estar en mode regeneració. El convertidor serà el dispositiu encarregat de gestionar el funcionament de totes les tensions i compta amb un sistema de transformadors i rectificadors electrònics.

En el cas del Toyota Mirai, es situa a l'eix de darrera junt a la roda. Amb el nou convertidor de corrent continu i els components d'alt voltatge s'estalvia un 21 per cent de pes, situant-se en 25,5 kg i, per primera vegada, es fa servir un semiconductor de carbur de silici per a l'*Intelligent Power Model* que permet fer-ho més petit.

1.5.1.5. Sistemes auxiliars

Els sistemes auxiliars de la pila electroquímica junt amb la pila són els elements que formen el sistema de pila de combustible. És essencial tenir un funcionament molt controlat per la unitat de control de tots els elements del sistema, ja que el funcionament òptim d'aquests és tant important com el de la pila en sí.

D'aquesta manera, el funcionament òptim dels elements que s'estudien en aquest apartat, que ajuden en la humidificació, sistema de gestió tèrmica, distribució de gasos i control de vàlvules sota una unitat de control electrònica són essencials i han de treballar de manera òptima perquè el sistema global treballi a un bon rendiment.

La resposta de la reacció que es dur a terme dins la pila de combustible és molt ràpida. Per contra, la resposta de la potència generada per la pila està limitada pel flux d'aire i combustible, la regulació de pressió, la gestió de l'aigua i el calor produït en la reacció (**Figura 21**). El sistema de control de la pila de combustible (**1.5.1.2**) ha de mantenir una temperatura òptima, una correcta hidratació de la membrana i controlar la pressió parcial dels gasos al càtode/ànode per evitar la degradació del voltatge produït i, per conseqüència, pèrdua d'eficiència, així com cuidar la vida útil de la pila.

Aquests paràmetres de la pila han d'estar controlats per un ampli rang de potències depenent de la demanda de la pila en cada instant de funcionament, amb una sèrie d'actuadors com vàlvules, bombes, compressors, expandors, ventiladors, humidificadors i condensadors.

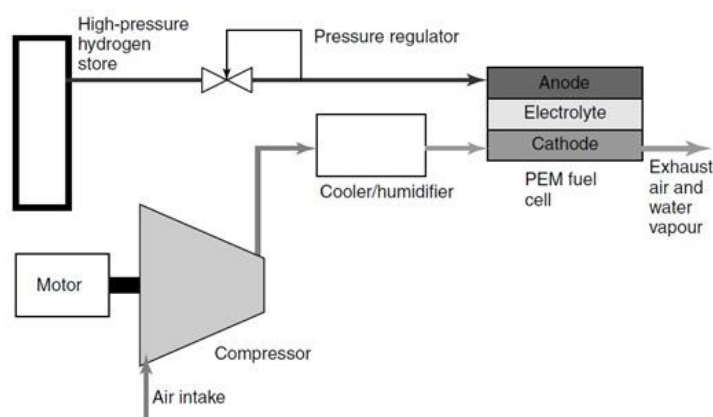


Figura 21 - Esquema de funcionament pila de combustible. Fuente: *James Larminie, Andrew Dicks*.

- **Compressor**

Abans d'arribar al compressor, el sistema necessita alimentar-se d'oxigen. En algunes aplicacions de piles de combustibles aquesta alimentació es fa a partir d'hidrogen pur emmagatzemats en tancs. En els aquest cas, degut a que es tracta de piles PEM per aplicació a l'automoció els vehicles agafen l'aire directament de l'atmosfera, que a més de ser un recurs més senzill que no necessita d'emmagatzematge i proveïment d'oxigen pur, redueix el pes i cost del sistema.

En el cas del Toyota de segona generació, un filtre neteja les impureses de l'aire que entra a la pila, un requisit imprescindible per al correcte funcionament d'aquesta. Una tela carregada elèctricament atrapa les partícules de menys de 2,5 micres de diàmetre, entre les quals les d'òxid de nitrogen (NOx) i diòxid de sofre (SO₂).

Normalment, les pressions a les que treballa una pila de combustible PEM van des de l'ambient fins, aproximadament, 3 bars en temperatures de 60 – 80 °C. Per obtenir una alta densitat de potència es funciona a pressions més altes gràcies al compressor, tot i que l'eficiència global del sistema pot ser menor degut a la despesa energètica de la compressió de l'aire. Per altre banda, injectar aire a temperatures més elevades també augmenta la densitat energètica, però poden representar un desafiament per la gestió de l'aigua i calor de la pila, especialment a pressions de funcionament baixes.

El augment de potència obtingut al operar amb pressions més altes és principalment el resultat de la reducció de sobretensió en l'activació del càtode ja que la pressió augmentada

augmenta la densitat de corrent de la reacció, el que té un efecte directa en la tensió del circuit obert (equació de Nernst). Quan la es produeix una demanda dràstica de corrent a la pila, el nivell d'oxigen del càtode baixa dràsticament i això pot provocar danys a la pila o una pèrdua d'eficiència. Aquest fenomen es coneix com “oxygen starvation” i és un indicador del excés d'oxigen al càtode (λ_{O_2}):

$$\lambda_{O_2} = W_{O_2 in} / W_{O_2, rcc}$$

Equació 16 - Excés d'oxigen al càtode

On:

$W_{O_2 in}$ és el flux d'oxigen que entra al càtode

$W_{O_2, rcc}$ és el flux d'oxigen que reacciona al càtode

Així doncs, la velocitat de la reacció dependrà de de la corrent demandada per la pila (I_{PC}):

$$W_{O_2, rcc} = M_{O_2 in} \cdot n \cdot I_{PC} / 4F$$

Equació 17 - Velocitat del flux d'oxigen a la pila

On:

$M_{O_2 in}$ és la massa molar de l'oxigen

n és el número de cel·les de la pila

F és el número de Faraday (96485 Coulombs)

Per tant quan la demanda de corrent a la pila augmenta, el valor de λ_{O_2} disminueix instantàniament i per mantenir el nivell d'oxigen a la cel·la, el controlador haurà de subministrar més aire a la pila, augmentant el flux $W_{O_2 in}$ mitjançant un augment de voltatge al compressor que injecta aire al càtode.

És necessari que la pila tingui un sistema que permeti una ràpida recuperació del nivell d'oxigen per evitar els possibles inconvenients esmentats. Per evitar aquesta manca d'aire, les piles utilitzen un sistema de control predictiu funcional (PFC) que controla i preveu el consum de l'oxigen al càtode.

- **L'humidificador**

L'humidificador té la funció de mantenir constant la humitat relativa del combustible i l'oxidant. Aquest element és essencial al sistema per garantir la presència d'aigua a la membrana en tot moment, la humitat relativa en l'entrada s'hauria de trobar entre el 60% i el 70% per evitar el assecat de la membrana.

Una manera d'aconseguir això, és humidificar l'aire a l'entrada del càtode (**Figura 21**), tot i que també es podria dur a terme a l'entrada d'hidrogen o a ambdós. En la gran majoria de piles de combustible la humidificació es dur a terme a l'aire just abans d'entrar a la pila de combustible.

Exposar a la cel·la a una deshidratació de la membrana pot desencadenar els següents defectes:

- Deteriorament prematur de la membrana. S'ha observat que l'assecat de la membrana pot desencadenar degradació prematura i esquerdes en aquesta.
- Reducció de la taxa de transferència de cargues a través de l'electròlit. La humitat de la membrana i la transferència de càrregues són directament proporcionals ja que aquest és el medi de propagació de les mateixes.

Per contra, un excés d'hydratació pot implicar:

- Inundació dels elèctrodes. Consisteix en un bloqueig dels porus que impedeixi realitzar correctament l'intercanvi, reduint la tensió de la cel·la.

Per tots aquests motius és necessari dissenyar un sistema d'hydratació que asseguri la presència d'aigua en la membrana en tot moment, tant per obtenir un funcionament òptim com per allargar la vida útil de la pila.

En el cas del Toyota Mirai II, objecte d'exemple en aquest apartat, el control de la qualitat de l'aigua es dur a terme mitjançant un sistema de circulació interna que fa circular l'aigua formada de la reacció a la cel·la per produir electricitat, pel que no requereix l'ús d'un humidificador. Fet que, de la mateixa manera que amb els tancs d'oxigen, redueix els components del sistema, guanyant en espai interior i costos.

- **Regulador de pressió del combustible**

L'objectiu del control de subministrament d'hidrogen es mantéixer l'hidrogen a la mateixa pressió que l'aire que entrarà pel càtode. És molt important controlar la pressió d'entrada del combustible i l'oxidant per evitar possibles danys a la membrana de la pila, a més, és convenient un nivell d'hidrogen en excés per millorar la resposta instantània de demanda de potència, tot i que si malgastes hidrogen en la reacció, hauràs de tenir un sistema per recuperar el combustible no emprat per obtenir un bon rendiment (recirculació d'hidrogen romanent).

Gràcies a que els vehicles que funcionen amb hidrogen emmagatzemen el combustible en tancs a altes pressions, concretament a 700 bars (**1.5.1.1**), el regulador de pressió l'únic que ha de fer és "alliberar la pressió" de l'hidrogen comprimit provinent del tanc fins a 0,4-3 bars aproximadament. Aquest mètode d'alimentar hidrogen a l'ànode es coneix com esmorteïment, el que implica que no hi ha ventilació o circulació del gas, sinó que aquest és directament consumit per la cel·la.

- **Refrigeració**

Aquest és un dels punts claus dins d'una pila de combustible, ja que l'eficiència que caracteritza a les cel·les que la formen, depèn directament d'un sistema de refredament efectiu. És completament necessari que existeixi un sistema de refrigeració que mantingui un cert nivell de temperatura mentre el sistema funcioni, que eviti pèrdues de rendiment quan la temperatura és massa baixa i possibles perills quan la temperatura es dispara.

A més, és necessari un circuit de refrigerant que refredi o escalfi les cel·les de manera uniforme per evitar la presència de punts calents. Els punts calents són punts d'alta resistència o mal refrigerats, que al estar a temperatures molt altes poden formar forats a la membrana, degradant-la i reduint així la seva vida útil.

Per aquest motiu és tant important monitoritzar la temperatura del flux intern del refrigerant a l'interior de la pila, així com els fluxos de temperatura al voltant dels col·lectors d'entrada i sortida dels gasos reactius, ja que tindran una influència directa i massiva en la distribució de temperatura de les plaques bipolars.

Existeixen diverses tecnologies de refrigeració de piles, principalment diferenciades per la naturalesa dels fluids de l'intercanvi.

- **Refrigeració per aire.** Bàsicament consisteix en un bufador que subministra l'aire necessari per la reacció del càtode refredant alhora la pila de combustible. Degut al consum energètic que suposa el bufador, ja que ha d'estar renovant l'aire constantment, aquest mètode només és aplicable a piles de baixa potència.
- **Refrigeració líquida.** Són circuits, sovint en forma de serpentí, que mitjançant fluids de refrigeració regulen la temperatura entre l'ànode i el càtode. Aquesta refrigeració és vàlida per a piles de major potència (>5kW) amb fluxos de calor elevats, mentre que en piles més petites serà més complexa implementar un circuit de refrigeració interna.

En el cas del Toyota Mirai, aquesta refrigeració es dur a terme dins del mòdul compacte FC on es situa la pila de combustible. Aquest sistema és un sistema de refrigeració líquida que permet mantenir la temperatura de la pila en un rang d'entre 30°C i 70°C. Aquesta és una significant millora que ha anunciat el fabricant japonès respecte la primera generació del model, i és que l'actual, pot arrancar a temperatures de fins a 30 graus sota zero. Evidentment, sota unes condicions ambientals d'aquestes característiques, la pila de combustible no funcionarà amb el mateix rendiment, no fins que no arribi a les temperatures òptimes de funcionament, però gràcies al suport de la bateria, pot començar a funcionar.

1.6. Motors de combustió d'hidrogen

Fins la actualitat, els únics vehicles propulsats per hidrogen que han estat comercialitzats generaven l'energia a partir de cel·les de combustible instal·lades a la part davantera dels vehicles. Gràcies a la quantitat d'empreses involucrades en la transició energètica i a la necessitat de crear noves tecnologies que rellevin els tradicionals motors de combustió, en els darrers anys s'ha vist que és possible utilitzar l'hidrogen com a combustible per motors de combustió interna.

Els motors de combustió d'hidrogen es poden separar en dos tipus de variants, els de moviment lineal (motors convencionals), i els motors Wankel o rotatius. Ambdós motors tèrmics, detallats en els pròxims apartats, han estat aplicats en l'automoció utilitzant combustibles fòssils del petroli o gas, però són recents els avenços que hi ha hagut amb l'hidrogen com a combustible.

Realment el que les empreses han procurat, és adaptar els seus motors de combustió convencionals per poder-los fer funcionar amb hidrogen, però aquest procés no és tan fàcil i requereix certa adaptació de les màquines degut a les propietats del gas.

Al utilitzar l'hidrogen com a combustible, s'utilitza una barreja amb major energia per unitat de massa que en un motor convencional, pel que és més optimitzable 1 gram d'hidrogen que 1 gram de benzina. La principal diferència amb els motors de combustió és que com a producte de la reacció produeixen H_2O , en lloc de gasos tòxics i NO_x . Tot i que aquesta reducció de gasos tòxics, encara no és total, és molt inferior als motors convencionals i es poden eliminar amb sistemes de postcombustió.

Per altre banda, també presenten altres diferències amb els tipus de relació aire-combustible, compressió (sobre tot), temps i energia de ignició. És per això que, tot i que el principi de funcionament sigui molt similar als motors convencionals de combustió interna, els motors d'hidrogen necessitaran una estructura adaptada a les seves condicions de funcionaments.

En definitiva, tenim un combustible amb major relació energia-unitat de massa que es pot utilitzar amb un dosatge molt pobre, fet que garanteix la disminució del consum i que a més, presenta un octanatge elevat, per la qual cosa podem augmentar la relació de compressió per augmentar la potència. Tot i així, cal destacar que no tot són avantatges, el principal problema és que al ser un gas, la seva energia depèn de la densitat de massa, pel que cal tenir-lo a una gran pressió per aconseguir un rendiment tan elevat, tot i que els actuals motors convencionals tenen una sèrie de limitacions força rellevants que fan que el rendiment no superi 1/3 del rendiment que podria arribar a donar el combustible. (13)

1.6.1. Motor Wankel

El motor Wankel és el motor de combustió interna que funciona de manera totalment diferent als motors alternatius, ja que és un motor rotatiu de quatre temps que utilitza rotors enlloc dels pistons tradicionals.

El primer prototip d'aquest tipus de motors va ser creat per Felix Wankel en 1957, i era un motor de combustió interna amb un pistó que accionava el cigonyal mitjançant un engranatge, comunicant així el moviment de gir. Posteriorment, varies marques com NSU, Peugeot o inclús Mercedes van apostar per aquesta tecnologia, però només Mazda va apostar

realment per els motors rotatius i encara a dia d'avui segueixen produint models en sèrie, és per això que en aquest apartat es dedica una secció a aquesta marca i com està adaptant la tecnologia perquè pugui treballar amb l'hidrogen.

1.6.1.1. Parts i funcionament

Per comprendre com funciona un motor rotatiu, es detallen breument les principals parts i funcionament d'aquest:

- La llumenera d'admissió LA (1) i d'escapament LE (2), estan situades una a cada cantó de l'estator.
- El estator (3), cos fixe que té una figura pràcticament el·líptica en l'interior.
- El rotor (4), és una peça en forma de triangle equilàter de dues bandes curvilínies que es mou a l'interior de l'estator amb una corona dentada a l'interior. El vèrtex del rotor estan en contacte permanent amb les parets de la càmera. Cadascun dels cantons porten un buidat que fa de càmera de combustió.
- El pinyó (6), és una roda solidària a l'eix motor (5) que engrana amb la corona dentada del rotor.
- Càmeres d'aigua (7), refrigeren el motor.
- La bugia, es situa al cantó oposat de la llumenera i s'encarrega de fer saltar la espurna sobre la barreja de combustible. (14)

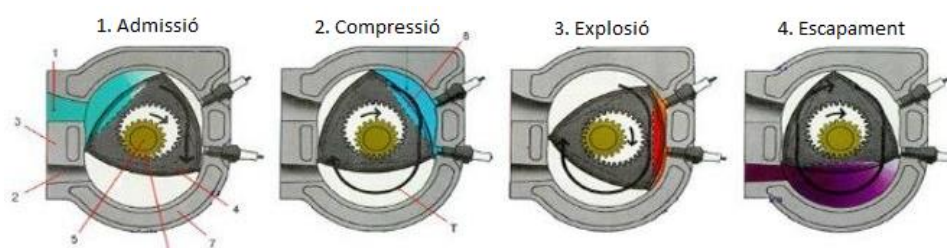


Figura 22 – Cicle de funcionament del motor rotatiu Wankel (15)

Tal i com es mostra a la Figura 22, en un motor Wankel es desenvolupen les quatre etapes característiques del motor de combustió interna:

1. **Admissió:** mentre es produeix la fuga de gasos de cicle anterior a través de la LE, comença l'admissió de la barreja nova per la LA. La càmera va augmentant de volum a mesura que gira el rotor, arrossegant l'eix, i comença a introduir la barreja, ja que la LA es troba oberta.
2. **Compressió:** la LA ha quedat tancada i la càmera comença a disminuir-ne el volum. En aquest moment es produeix la compressió de la barreja. Quan la càmera ha quedat reduïda el mínim volum i la compressió de la barreja és màxima, salta l'espurna i es produeix la ignició de la barreja.
3. **Explosió:** a causa de la pressió dels gasos produïts per la combustió, el rotor empès a girar bruscament i comunica aquest moviment a l'eix motor a través de l'engranatge pinyó corona. Es produeix la ignició de la barreja.
4. **Escapament:** l'altre vèrtex del rotor descobreix la llumenera d'escapament LE per la qual els gasos cremats són expulsats a l'exterior empesos pel moviment del rotor. D'aquesta manera es complementa el cicle. (14)

1.6.1.2. Aplicació de l'hidrogen

Com s'ha esmentat en la introducció de l'apartat, Mazda ha estat la única marca que ha comercialitzat aquest tipus de motors, i ho ha fet sota el capó dels models esportius RX-7, RX-8 i RX-9. Aquests models presentaven algunes avantatges respecte els seus competidors i donaven molt bons resultats de potència en pista, però també necessitaven un manteniment més exhaustiu i donen alts consums de carburant.

Degut precisament a aquest alt consum, s'havia qüestionat molt a la marca sobre si seguiria produint aquesta tecnologia, però alguns representants de la marca japonesa afirmaven que aquest és un sistema que forma part de la seva identitat i que l'adaptarien a tecnologies electrificades i hidrolitzades.

La veritat és que malgrat haver tingut una trajectòria relativament poc rellevant en la història de l'automoció, els motors Wankel han seguit en desenvolupament per a aplicacions primordialment militars, tant en *drons* de reconeixement, com avionetes i fins i tot tancs. Per això, el 2008, Garside patentés un motor Wankel refrigerat per aire i que prescindia completament del fet de cremar oli per a la seva refrigeració.

Aquest concepte de funcionament té un avantatge afegit, i és que ajuda l'hidrogen a assolir la pressió òptima de la cambra de combustió abans de saltar l'espurna. Quant a la utilització de l'hidrogen com a combustible en si, ofereix així mateix altres beneficis com a temperatures més homogènies a les cambres de combustió i la prevenció de detonacions no desitjades.

El desenvolupament d'aquest motor, segons Garside, només preveu l'ús d'un rotor per contenir els costos de fabricació, manteniment i pes. No en va, aquests motors només treballaran a una càrrega i règim de revolucions constant. Tot i així, es planeja oferir-lo en diferents mides segons el tipus de transport a què vagi dirigit

El model sobre el qual es duu a terme el desenvolupament cubica 225 centímetres cúbics, ofereix 16 cavalls i un pes de tot just 10 quilos, aniria destinat a flotes de taxis i furgonetes lleugeres. Contemplen també un amb 650 centímetres cúbics, 46 cavalls i 24 quilos de pes, pensat per a autobusos urbans. Finalment planegen també oferir-ne un amb 2.0 litres i 125 cavalls per a camions i vehicles de gran pes que podrien fins i tot incorporar dos o tres motors addicionals.

Per acabar, comentar que la pròpia Mazda ja fa temps que té en consideració aquest tipus de funcionament per a les seves mecàniques Wankel. De fet, va construir un prototip de RX-8 alimentat per hidrogen ja l'any 2009. Això sí, el projecte era inviable comercialment per la necessitat de la instal·lació d'un tanc enorme a l'espai del maleter. Tot i així, és probable que la firma hagi dut a terme la seva pròpia investigació i puguem veure resultats en els propers anys. (15)

1.6.2. Motor lineal i en V

El motor lineal, en V o motor convencional és la tecnologia que utilitzen la gran majoria dels motors de combustió i híbrids que circulen avui dia. Podem trobar nombroses variants dels motors de combustió interna i que són classificables en funció del carburant i la disposició i número de cilindres que utilitzin per funcionar.

En aquest apartat s'explica com funcionen els motors de benzina i dièsel, per entendre l'adaptació que se'ls pot fer per tal que treballin amb hidrogen. Tot i que es fa referència i es detallen les diferències entre el motor d'explosió i el d'ignició, aquest primer és en el que s'està treballant per la aplicació de l'hidrogen, ja que el motor de combustió d'hidrogen

funciona de manera molt similar al de benzina i comparteixen molts components del bloc motor.

1.6.2.1. Motors de benzina i dièsel

En primer lloc trobem el motor de benzina, que requereixen una espurna generada per una bugia per encendre el combustible, pel que són reconeguts com a motors d'explosió. Aquests poden ser de 2 o 4 temps, sent la segona opció la que predomina en l'automoció, tot i que la primera segueix present en aplicacions a ciclomotors o màquines industrials. La denominació dels motors de dos i quatre temps, fa referència a les fases del procés de funcionament; els motors de quatre temps tenen admissió, compressió, expansió i escapament, on el cigonyal completa dues voltes per combustió, seguint el mateix principi de funcionalment que els motors Wankel del punt anterior. Per altre banda, els motor de dos temps duen a terme la compressió i la admissió en un mateix moviment ascendent, deixant la expansió i l'escapament pel moviment descendent del pistó. En aquest apartat com es fa referència a la propulsió d'automòbils, parlarem dels motors de 4T.

La diferència principal entre el motor dièsel i un amb cicle Otto convencional alimentat per benzina, és la absència de l'espurna generada per la bugia a la combustió, doncs aquest produeix una autoignició i fa encendre el carburant gràcies a la compressió del cilindre.

A la següent taula es detallen les principals diferències:

	Motor benzina	Motor dièsel
Carburació	Barreja externa (excepte injecció directa)	Barreja interna
Encès	Encès per espurna (bugia)	Encès automàtic
Pressió de compressió	De 8 a 18 bars	De 30 a 50 bars
Temperatures màximes de compactació	De 400 a 600°C	De 700 a 900°C

Taula 9 - Comparativa motor benzina i dièsel

En el motor de benzina (excepte per injecció directa) s'aspira una barreja de combustible i aire, mentre que en el motor dièsel és simplement aire. És per això que la gran majoria dels motors dièsel amb mitjana o alta potència estan turbo alimentats.

Cadascun dels 4 temps de treball té un lloc en un sol cicle (recorregut del pistó en moviment ascendent i descendent). Durant un cicle de treball complet, el cigonyal gira dos cops, per tant estan separats per complert els gasos d'escapament dels gasos frescos. (18)

En la següent taula es comparen els cicles de treball dels dos motors:

	4T - Motor benzina	4T - Motor dièsel
Admissió	La benzina es barreja amb l'aire, s'obra la vàlvula d'entrada, el pistó va des de el punt mort superior fins l'inferior.	S'obra la vàlvula d'entrada, flueix l'aire, el pistó va al punt mort inferior.
Compressió	El pistó va de punt mort inferior al punt mort superior, la barreja aire-combustible es comprimeix tan aviat com la vàlvula d'entrada es tanca.	El pistó puja, l'aire es comprimeix tan aviat com es tanca la vàlvula d'entrada, i per tant s'escalfa fortament
Funcionament	La barreja aire/gasolina s'encén a través de la bugia, el pistó va del punt mort superior al punt mort inferior	El dièsel s'injecta, s'encén i el pistó es mou del punt mort superior al punt mort inferior.
Escapament	El pistó va del punt mort inferior al punt mort superior i força els gasos d'escapament a través de la vàlvula d'escapament	El pistó va del punt mort inferior al punt mort superior i força els gasos d'escapament a través de la vàlvula d'escapament

Taula 10 - Comparativa 4T motors benzina i dièsel. (18)

1.6.2.2. Aplicació de l'hidrogen al motor dièsel

En els darrers anys la indústria europea ha procurat donar molt pes i ha realitzat grans inversions en la tecnologia dièsel, des de els motors fins als sistemes d'injecció i control no només per automoció sinó per moltes altres aplicacions.

Algunes marques que han format part d'aquesta aposta pel gasoil, ara procuren trobar alternatives viables en quan a contaminació i volum de recursos, ja que el petroli és un recurs limitat del que algun dia haurem prescindir.

La multinacional Punch Powertrain té un projecte per convertir motors dièsel al ús de l'hidrogen, aquesta és una empresa molt enfocada al món de l'automoció i un soci habitual de fabricants com BMW, General Motors o Stellantis. Aquest projecte, entre d'altres motius, ve impulsat per la necessitat de trobar alternatives al transport pesat, que actualment es propulsa amb dièsel i que s'ha de treballar per buscar alternatives ja que l'electrificació d'aquests no és una opció viable.

El Grupo Puch está probando una evolución del GM Duramax V-8 de 6,6 litros que se alimenta de hidrogeno en lugar de diésel. (21)

Per demostrar aquestes aplicacions alternatives, l'empresa ha adaptat un propulsor de gasoil 6.6 amb 8 cilindres en V originalment de GM (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). Un propulsor molt conegut en l'àmbit industrial, aconseguint que aquesta màquina sigui capaç de substituir el dièsel per l'hidrogen a través d'una sèrie d'adaptacions.



Figura 23 - Motor Punch V8 (31)

Segons el comunicat per part del Grup Punch, l'adaptació del motor turbodièsel de GM no és complexa i només s'han de modificar els següents components:

- Cap dels pistons
- Sistema d'injecció
- Unitat de control que controla el funcionament del motor.

Per tant, aparentment resulta molt més senzilla l'aplicació de l'hidrogen al motor dièsel que al motor benzina, aconseguint (si s'usa hidrogen verd) una combustió lliure de CO₂. El grup està treballant en solucions lliures de gasos contaminants que ofereixin uns rangs de potència d'entre 80 i 400 kWh (entre 109 i 544 CV).

Punch tiene los derechos para vender en todo el mundo una versión del motor alimentada por hidrogeno, y una versión diésel puede venderse en cualquier parte, excepto EE.UU. (21)

A més a més, el grup està estudiant com una càmera de combustió de 500 cc podria acomodar una varietat de cilindrades, des de V6 de 3 litres fins a un L4 de 2 litres. *Tambien podemos fabricar un motor tricilíndrico de 1,5 litros, pero no está en nuestros planes a corto plazo.*

(21)

Evidentment aquesta aplicació té una sèrie de processos i, sobre tot, reptes tècnics als que l'empresa ha de demostrar que pot superar. Un d'ells és que l'hidrogen crema set vegades més ràpid que el diésel i això significa que s'ha de baixar la temperatura de la càmera de combustió. Per altre banda la injecció d'hidrogen a la càmera és una tècnica més o menys provada que segueix presentant inconvenients, entre ells la corrosió.

Un altre inconvenient és la lubricació del motor, ja que tendeixen a ser motors molt secs i donen peu a averies mecàniques, la lubricació per polvorització seria probablement la millor solució. Segons el grup, el bloc motor en sí mateix només requeria canvis a la culata.

Per últim i probablement el repte més gran d'aquesta adaptació, és el redissenyar els injectors i la unitat de control per introduir l'hidrogen a la combustió. L'empresa belga ha comunicat que té previst comercialitzar aquests motors en el 2024, entenent que és una tecnologia que encara han de millorar i que compten amb que Europa comenci a construir un gran nombre d'estacions de càrrega d'hidrogen a la carretera principal. .

El Pacte Verd de la UE proposa que, per al 2030, hi hagi una estació de recàrrega d'hidrogen cada 150 quilòmetres al llarg dels corredors de la xarxa transeuropea de transport. Això és més que suficient per als camions pesants, seguits pels vehicles comercials lleugers. (21)

1.6.2.3. Aplicació de l'hidrogen al motor benzina

Bé és cert que en els darrers anys diversos fabricants del món del transport s'han plantejat aplicar l'hidrogen com una alternativa al diésel o a la benzina, buscant la millor via a seguir d'acord amb la transició energètica. El fet és que fins fa relativament poc, l'única tecnologia que s'havia provat i comercialitzat ha estat la pila d'hidrogen, en els seus diferents tipus tal i com hem vist a l'apartat 1.4.

El panorama canvia, al demostrar-se que l'hidrogen és capaç de millorar la combustió dels combustibles existents, el qual no només permet fer combustions molt més netes, sinó

significa un estalvi econòmic degut al fet que les barreges d'hidrogen-combustible es cremen de manera més complerta.

En teoria, la idea de cremar hidrogen enlloc de benzina sembla ideal i a priori podem pensar que serà una combustió 100% neta (sempre que parlem d'hidrogen verd), però la realitat és que l'aire de l'ambient no està compost únicament d'oxigen, també conté nitrogen que també serà cremat, en menor mesura en el procés. Per tant, tindrem una combustió que no només produirà aigua, sinó també òxids de nitrogen (NO_x), que es poden controlar mitjançant catalitzadors.

D'altra banda, el motor també crema una mica d'oli, d'origen fòssil, i per tant la seva combustió emet CO_2 . Jason Finsk, d'Engineering Explained, va calcular unes emissions de CO_2 per al motor del Corolla d'hidrogen de 187 kg al llarg de 200.000 milles (322.000 km) davant de les 72,5 tones d'un motor de benzina equivalent i la mateixa distància. És a dir, unes emissions de CO_2 de 0,58 g/km per a l'hidrogen i de 225 g/km per a la benzina. És un motor gairebé emissions zero, però no del tot emissions zero. (20)

L'hidrogen pot millorar la combustió dels motors benzina i això significa poder estalviar en consums degut a que la barreja es crema uniformement, però no sempre més és millor, ja que si s'aconsegueix que el motor benzina cremi el 100% del combustible, el fet d'afegir hidrogen no millorarà l'eficiència del motor, sinó la reduirà.

Tenint en compte que el gas en qüestió crema 10 vegades més ràpid que la benzina, la combustió del hidrogen en excés té lloc en el moment incorrecte dins del cicle dels 4 temps; competint així amb el moviment del pistó. En el disseny d'un motor per funcionar amb hidrogen, crea la espurna quan el pistó està a la part superior del recorregut, mentre que els motors benzina generen la guspira molt abans, mentre el pistó encara està completant el seu recorregut ascendent. Per tant, si existeix hidrogen en la barreja de combustible, aquest excés actuarà en contra del pistó perdent així eficiència del motor i donant com a resultat un funcionament irregular.

Per contra, són molts els desafiaments per produir suficient hidrogen com per fer que el motor funcioni sense benzina:

- Control del flux de HHO per complir amb les necessitats dinàmiques del motor de benzina.

- El generador de HHO, depòsit d'aigua i banc de bateries són alguns dels components que hauria d'arrossegar el vehicle.
- La bateria de 12V no té la capacitat de proporcionar la corrent necessària.
- Sistema generador de HHO massa gran i costós.

Per il·lustrar les dificultats esmentades, es presenten a continuació alguns càlculs per la conversió d'un motor petit d'un litre perquè funcioni al 100% amb HHO:

Tenint en compte que els motors de combustió interna converteixen la benzina en energia mecànica amb una eficiència que envolta el 25%, la implementació de l'hidrogen necessitaria una energia d'entrada (HHO) d'uns 149 Kw per ser capaç de produir una potència de sortida de 50 cavalls.

$$\frac{50 \text{ HP}}{1,341} = 37,29 \quad \text{Equació 18}$$

$$\frac{37,29}{0,25} = 149,16 \text{ kW} \quad \text{Equació 19}$$

Els electrolitzadors categoritzats per el consumidor són al voltant d'un 50% més eficients, el que significa que es necessiten 298 kW d'energia elèctrica per produir els 149 kW de HHO, aquesta energia es treu de la bateria del vehicle.

$$\frac{149,16}{0,5} = 298,32 \text{ kW} \quad \text{Equació 20}$$

En un vehicle convencional, les bateries que ajuden al circuit elèctric (llums, intermitents, sistema electrònic, etc.) són normalment de 12 volts, tenint en compte que per aquesta demanda energètica es necessiten 25 ampers per arribar als 298 quilovats, es necessitarien més de mil bateries connectades en sèrie i tot i així no es podria subministrat el corrent necessari. Les bateries de 12V convencionals poden oferir 25 ampers durant un temps prolongat i tenen una capacitat de 1,5 hores. Tenint en compte aquesta demanda, ni que es connectessin mil bateries en sèrie, el cotxe només es podria conduir 1,5 hores.

$$P = V \times I$$
$$298320 \text{ W} = 12 \text{ V} \times I$$
$$I = 24,86 \text{ A}$$

Equació 21

A part de que òbviament no es podria carregar un banc de bateries d'aquestes característiques i s'hauria d'adaptar la base del vehicle per poder carregar una bateria de més capacitat, no seria gens pràctic ja que també hauria de carregar amb els dipòsits d'hidrogen a més de tots els components del sistema.

Un generador capaç de produir 1562 litres de HHO per minut, es un desafiament d'enginyeria pràcticament impossible de dur a terme, sumant-li que els motors a l'automoció són molt dinàmics i els seus requeriments de combustible canvien constantment en fraccions de segons depenent de la demanda de gas i el rang de potència que se li demani. La electròlisi no respon de per naturalesa, i és molt difícil canviar instantàniament el flux d'hidrogen, fins l'actualitat, no existeix manera possible de controlar 25 ampers i manipular el flux de HHO amb precisió per complir amb les necessitats dinàmiques de un motor de combustió interna.

Com a conclusió d'aquest darrer exemple, està clar que NO és possible generar un flux d'hidrogen suficient com per poder utilitzar-lo com a combustible principal del vehicle. Està clar que en la implementació als motors aquesta feina haurà d'estar feta, és a dir, els cotxes utilitzaran l'hidrogen únicament com a combustible, emmagatzemant en els tancs el combustible ja creat amb antelació.

Per altre banda, si hi hagués una font elèctrica (bateria) de 298 kW disponible a bord, seria molt més eficient i econòmic utilitzar-la per alimentar una o dues màquines elèctriques i per tant, fer un vehicle elèctric i evitar totes les pèrdues d'energia del motor de combustió interna i l'electrolitzador.

Per tant, veiem que l'hidrogen sí és capaç de millorar la combustió dels motors ja existents però té certes dificultats que han de ser neutralitzades per controlar la combustió a la càmera i, a més, necessitaríem un segon tanc de combustible per emmagatzemar-lo.

Bé és cert que els estudis sobre el paper i els primers prototips que hem pogut veure de diversos fabricants apunten a que l'hidrogen sí pot ser un clar substitut del motor de

combustió interna, però la realitat és que aquesta tecnologia presenta inconvenients a ser resolts.

El principal inconvenient es la densitat energètica de l'hidrogen, ja que comparat amb la benzina és 9 vegades més petita, i això provoca la necessitat de transportar un tanc força gran, que en alguns models presentat han allotjat al maleter. Per altre banda, la eficiència que treuen aquests motors respecte un elèctric de pila de combustible i la poca potència que donen els prototips presentats. A més a més, actualment un dels majors problemes als que s'enfronten aquests motors és que no es poden utilitzar fora d'un circuit i no tindran sentit a Europa si no es modifica la proposta de la Comissió Europea de prohibir els motors de combustió al 2035. (21)

Són varies les marques que participen a la cursa de patentar i trobar la tecnologia que més encaixi per transformar els motors i són molt recents les notícies que tenim d'elles, algunes d'elles sense saber en quin punt de desenvolupament es troben. És per això que en els següents apartats es detallen dues innovacions molt recents de dos gegants del món de l'automoció que apunten, en molt bona mesura, a formar part d'aquesta transformació de la combustió interna.

1.6.2.3.1 L'aposta japonesa

Per parlar de les innovacions respecte els motors modificats per treballar amb hidrogen, no es podia passar per alt la indústria japonesa, que com ja s'ha esmentat al llarg del projecte, és una de les que aposta més per aquesta tecnologia i, junt amb la coreana i americana, la que presenta el parc més gran de cotxes amb pila d'hidrogen.

Tal i com hem vist amb Mazda i la seva idea de reconvertir el seu icònic motor rotatiu (pàg. 73), els seus competidors com Toyota o Lexus també estan treballant per adaptar els motors de combustió a l'hidrogen, tal i com es detalla en els següents punts. Altres marques de les que es parlarà a continuació també han presentat models alimentats per pila d'hidrogen però s'han posicionat en contra de dissenyar motors per combustionar-lo, almenys, de moment.

- **Toyota Corolla Sport H₂**

Com ja hem vist amb el Toyota Mirai, aquesta és una de les firmes que més fort està apostant per l'hidrogen i que ara dóna un nou pas a provar el nou Corolla Sport en competició.

Representant a l'equip ORC ROOKIE Racing a les 24h de Fuji NAPAC Super Tec, Toyota Motor Corporation va aconseguir completar amb èxit la cursa de 24 horese celebrada en la ciutat d'Oyama, entre el 22 i el 23 de maig de 2021. Aquesta mecànica de Toyota es compon per tres cilindres en línia turbopulsat i que opera únicament amb hidrogen.

Aquesta va ser la primera carrera del món on participava un automòbil que utilitzava hidrogen com a combustible, amb un motor capaç d'emetre un so similar al d'un vehicle convencional però que gairebé no generava diòxid de carboni i que el que treia pel tub d'escapament era, bàsicament, aigua. L'equip va ser capaç de completar la cursa d'un dia sencer amb un resultat espectacular, amb 358 voltes o 1634 km recorreguts en pista.



Figura 24 - Toyota Corolla Sport a les 24h de Fuji NAPAC Super. (21)

“Esta carrera fue diseñada para ser el primer paso para ampliar nuestras opciones de neutralidad de carbono. En lugar de reducir mis opciones estableciendo y regulando objetivos, me di cuenta de que nuestras pasiones y acciones voluntarias, y nuestros esfuerzos más allá de los límites de la compañía basados en nuestros 5,5 millones de colegas (involucrados en la industria automotriz japonesa), cambiarán el panorama dentro de 10 o 20 años”. Akio Toyoda, President de Toyota Motor Corporation. (21)

Toyota busca clarament el desenvolupament de motors d'hidrogen per arribar a la neutralitat del CO₂, i asseguren que en els pròxims anys els vehicles elèctric seran el punt d'atenció principal, però si tots els automòbils es converteixen a elèctrics, es perdran un milió de llocs e treball al Japó. Amb aquesta implementació, en canvi, s'aconseguirà reconvertir la indústria de la combustió.

- **Toyota GR Yaris H₂**

Aquest model de la marca és una versió conceptual que va ser presentada al fòrum anual Kenshiki de Toyota, on el fabricant japonès va reforçar el compromís de la companyia amb el desenvolupament de sistemes de propulsió amb hidrogen com a alternativa a la electrificació total.

Aquesta presentació va tenir lloc mesos després de la cursa del Corolla Sport vist en el punt anterior, i de fet, aquest cotxe ja muntava el mateix motor 1.6 litres de tres cilindres amb turbo que es comercialitza per al Toyota Yaris però modificat perquè funcioni amb hidrogen. El GR Yaris H₂ concept equipa exactament el mateix motor que el cotxe de carreres, amb unes mínimes modificacions respecte al Corolla, i munta el mateix sistema d'emplenaments dels tancs d'hidrogen que el Toyota Mirai de sèrie.

Les modificacions mecàniques aplicades al motor són bàsicament per reforçar el bloc, degut a que l'hidrogen explota de manera més violenta que la benzina, incorporar nous assentaments de vàlvules i un sistema d'injecció millorat. Segons la marca, s'aconseguiran "eficiències similars" a les d'un convencional de benzines, però Toyota no dona xifres al respecte. (20)

- **Toyota prius 2023**

El Toyota Prius és un dels models més venuts a nivell mundial en els últims anys i és un autèntic icona de l'electrificació, és el que va marcar l'era de la hibridació a Toyota.

A finals del 2021 van començar a sorgir informacions i especulacions sobre com seria el pròxim canvi generacional de la gama Prius. El procés de disseny i desenvolupament del model ja estava en marxa, però els japonesos pretenen anar un pas més enllà i presentar, a més dels híbrids, un model propulsat per hidrogen.

El Toyota Prius 2023 apostarà per el motor de combustió d'hidrogen. (23)

Aquest model, de la mateixa manera que el GR Yaris, comptarà amb el mateix motor de competició que el Toyota Corolla presentat a les 24h de Fuji NAPAC Super Tec.

- **El motor V8 de Lexus**

Lexus és la marca Premium creada per Toyota en 1989 per competir, inicialment al mercat dels Estats Units i que posteriorment ha tingut una repercussió mundial. Al ser la mateixa companyia que Toyota, les dues marques van clarament de la mà en aquesta aposta per la crema d'hidrogen.

A finals del darrer any, Lexus va llençar un model que utilitzava l'hidrogen per propulsar un motor de combustió, es tracta d'un prototip anomenat ROV (Recreational Off-highway Vehicle). Aquest petit tot terreny (**Figura 25**) busca que el client gaudeixi de la conducció *offroad* sent respectuós amb el medi ambient.



Figura 25 - Lexus ROV. Font: Lexus

En aquest cas els de Lexus han anat més enllà muntant un bloc de només 1,0 litre. La firma no ha assenyalat més especificacions, apuntant a una adaptació de l'actual bloc de tres cilindres utilitzat als models més petits de la matriu nipona. Tot i això, sí que ha explicat que el funcionament és tan simple com que l'hidrogen comprimit a alta pressió al tanc es passa a la cambra de combustió directament a través d'un injector, assenyalant que amb prou feines es generen emissions atès que la quantitat de oli del motor que es crema és pràcticament igual a zero. (24)

- **Crítica de honda**

Honda va ser una de les marques japoneses que més fort va apostar per l'hidrogen, fins al punt de comercialitzar el Honda Clarity Fuel Cell, que es va deixar de fabricar en 2021. Honda, tal i com va fer Mercedes amb el Mercedes-Benz GLC F-CELL en 2020, va abandonar la producció de turismes amb pila de combustible.

“Hem realitzat investigacions sobre totes les possibilitats que hi ha. Pel que fa als motors d'hidrogen, veiem alguns desafiaments tecnològics força difícils. Aleshores, fa uns deu anys, vam decidir que això no es convertiria en el corrent principal” **Toshihiro Mibe, director executiu d'Honda.** (34)

Alguns dels motius que els fan veure aquesta alternativa poc viable, són la poca eficiència en la producció d'hidrogen mitjançant la electròlisi, que ja de per sí és un procés menys eficient que utilitzar energia directament per carregar una bateria, i en cas d'aplicar-ho a un motor tèrmic, la quantitat de combustible i, per tant, consum energètic que es produeix.

Així doncs, tot i que allunyada dels motors tèrmics, Honda continua treballant en el desenvolupament de la pila de combustible, “una solució que podria ser útil en vehicles de gran autonomia”.

Aparentment, Honda està col·laborant estretament amb General Motors en aquesta solució, tot i que de moment prioritza les bateries enfront l'hidrogen. La seva divisió aeronàutica també està interessada en aquest combustible, tot i que no està clar fins a quin punt ha avançat la companyia en aquesta tecnologia.

1.6.2.3.2 La patent de Ford

Ford patenta un motor de combustió impulsado por hidrogeno. (19)

En els darrers 24 mesos, Ford Motor Company ha fet grans compromisos amb el futur del seu negoci de vehicles a bateria. La companyia ha notificat d'augments de producció impulsats per la demanda dels seus dos BEV (Mustant Match-E i la camioneta F-150 Lightning). A principis del mes de març de 2022, Ford ha anunciat que estava dividint la seva companyia en dues divisions diferenciades, el model E que serà el responsable dels vehicles totalment electrificats en el futur, i una altre sèrie de vehicles elèctrics nous actualment en desenvolupament. En mig d'aquestes notícies i novetats que ha llençant la marca, Ford ha vist la necessitat en el seu principal mercat (EE.UU) de buscar alternatives als actuals motors de combustió i els seus enginyers han estat explorant silenciosament diferents maneres de mantenir d'una manera saludable la part de combustió interna del negoci.

Muscle Cars and Trucks ha descobert una patent presentada per Ford davant de l'Oficina de Marques i Patents dels EUA per a un motor de combustió que funciona amb hidrogen. Un vehicle típic impulsat per hidrogen utilitza un sistema de propulsió semblant al d'un vehicle elèctric, on l'energia emmagatzemada com a hidrogen es converteix en electricitat mitjançant la cel·la de combustible. No obstant això, la nova patent de Ford és per a un motor de combustió turboalimentat que funciona amb hidrogen. (19)

La combustió que genera aquest motor és molt neta, i és que farien falta 300 motors d'aquest tipus funcionant per generar la mateixa contaminació que la que produeix una sola màquina benzina. Per tant, aconseguix reduir en un 99,7% les emissions de carboni. Com a contra, la tecnologia presentada allibera menys energia per litre, el que significa que la quantitat que necessitarà el vehicle per recórrer 100 quilòmetres serà bastant superior a la de la benzina. Aquest fet sumat al preu de l'hidrogen per electròlisi que actualment encara és elevat, fan que la proposta a dia d'avui sigui poc rentable.

Lambda és la lletra grega utilitzada per representar el valor estequiomètric d'un combustible com a 1,00 . El valor estequiomètric d'un combustible és la relació per la qual tot el combustible es combina amb tot l'oxigen per produir una combustió completa. Els motors de gasolina tenen un valor estequiomètric de 14,7:1, cosa que significa que 14,7 parts d'aire per 1 part de gasolina equivalen a una lambda de 1. La combustió pobra es representa com un valor superior a 1,00 , mentre que les barreges més riques es mostren com a inferiors a 1,00.

Majoritàriament, un motor de gasolina pot operar en un rang de 8:1 al més ric a 18,5:1 a l'extrem pobre de l'espectre. Lambda es calcula submergint la relació aire/combustible en el valor estequiomètric del combustible, per la qual cosa la barreja de combustió de gasolina més rica es representa com a 0,54 lambda, mentre que la més pobra és 1,25 lambda. El nou mètode de combustió d'hidrogen amb turbocompressor de Ford cerca explorar valors lambda superiors a 2,00. Això significa que el motor seria capaç d'operar en un estat extremadament pobre, usant més del doble de la quantitat d'aire requerida per a la combustió estequiomètrica d'hidrogen.

Les dades disponibles indiquen que el valor estequiomètric de l'hidrogen és al rang de 34:1, per la qual cosa si Ford està executant una combustió d'hidrogen a un Lambda de 2.00 o més, això significa que el motor té una barreja d'aire/combustible almenys 68 parts d'aire per 1 part d'hidrogen. Pel que val, els motors LS convertits a hidrogen de Mike Copeland

funcionen a 100:1 amb l'ajuda d'un sobrealimentador. L'hidrogen és capaç de cremar-se en mescles pobres d'aire/combustible a causa de la baixa impedància d'ignició del combustible. En valors estequiomètrics, l'hidrogen té una velocitat de flama extremadament ràpida, es descriu com aproximadament un ordre de magnitud més ràpid que la gasolina. L'augment de la velocitat de la flama vol dir que hi ha moltes més possibilitats de detonació; no obstant això, si la barreja és més pobre, la velocitat de la flama es redueix. (20)

Perquè aquest mètode funcioni, l'hidrogen serà introduït a la cambra per injecció directa, el que permetrà controlar de manera independent la quantitat d'aire i combustible que insereix. Per últim, Ford afirma que el motor de combustió que té entre mans podria formar part d'un sistema de propulsió híbrid. L'exemple que mostra es tracta d'un híbrid en sèrie que fa actuar el motor d'hidrogen com a generador entre el motor i la transmissió, però la companyia afirma que podria utilitzar-se en híbrids en sèrie, paral·lel o sèrie-paral·lel. També s'ha de tenir en compte que la patent de Ford cobreix el mètode de combustió i el control de barreges d'hidrogen, i encara s'ha de treballar més per aconseguir un motor que posi en pràctica a la teoria i realment aprofiti les propietats úniques que presenta l'hidrogen com a combustible.

Anàlisi de l'impacte ambiental

1.7. Cas pràctic d'un usuari particular

Un cop s'han entès el funcionament del vehicle propulsat per pila d'hidrogen i se l'ha situat com a una alternativa electrificada i viable, hem d'analitzar l'impacte ambiental que produeix un cotxe amb aquesta tecnologia al llarg de la seva vida útil. Per poder conèixer realment l'impacte al medi ambient i quantificar quina tecnologia contamina més, es realitzarà una comparativa amb les diferents tipologies de propulsió actuals, passant per els motors de combustió més abundants al mercat (dièsel i benzina), el cotxe 100% elèctric i els cotxes híbrids.

Per realitzar aquest apartat, la solució més pragmàtica és fer un anàlisi del cicle de vida (ACV) dels diferents vehicles, tots ells aplicats en el mateix exemple de vida útil; el d'un usuari convencional que viu a Barcelona. L'Anàlisi del Cicle de Vida d'un producte és un tipus d'estudi que calcula els aspectes ambientals i els impactes potencials d'un element al llarg de tot el seu cicle de vida. Per realitzar correctament l'estudi, s'ha de tenir en compte la història del producte, començant des de el procés de fabricació fins que acaba sent un residu. Aquesta eina ens permetrà analitzar de manera metòdica, objectiva i comparable les diferents tecnologies i treure conclusions dels impactes que representen al medi ambient.

Per tal d'establir un ús comú per tots els vehicles, l'apartat es basarà en un possible usuari que utilitza el seu vehicle de manera utilitària, per anar a la feina a diari, dur al seu fill a activitats extraescolars tres cops per setmana i viatjar a la seva segona residència (vacances). Així doncs, per tal d'establir l'ús que li donarà l'usuari al vehicle (km/any) i començar a estudiar l'impacte del cicle de vida, es crea el següent escenari:

Activitat	Freqüència	Setmanes/any	Distància a recórrer (km)
Feina	De dilluns a divendres	48	35
Extraescolars	Tres cops per setmana	40	20
Segona residència	Cada dues setmanes	25	150
Altres	-	-	1000

Taula 11 - Distància anual de l'usuari

Calculem la distància anual que realitza l'usuari tenint en compte les variables de la taula:

$$D_{\text{anual}} = D_{\text{feina}} \cdot f_{\text{feina}} + D_{\text{extr}} \cdot f_{\text{extr}} + D_{\text{resi}} \cdot f_{\text{resi}} + \text{Altres} \quad (\text{Equació 22})$$

$$D_{\text{anual}} = 35 \frac{\text{km}}{\text{dia}} \times \frac{5 \text{ dies}}{\text{setmana}} \times \frac{48 \text{ setmanes}}{\text{any}} + 20 \frac{\text{km}}{\text{dia}} \times \frac{3 \text{ dies}}{\text{setmana}} \times \frac{40 \text{ setmanes}}{\text{any}} + 150 \frac{\text{km}}{\text{dia}} \times \frac{3 \text{ dies}}{\text{setmana}} \times \frac{25 \text{ setmanes}}{\text{any}} + 1000 \frac{\text{km}}{\text{any}}$$

$$D_{\text{anual}} = 23050 \frac{\text{km}}{\text{any}}$$

Per tant, el nostre usuari exemple farà un total de **23.050 km anuals**.

Un cop definida la distància que recorrerà el nostre usuari al llarg d'un any, cal definir la resta de variables que entren en el càlcul de la vida útil del vehicle.

Per mesurar les emissions que generen els diferents tipus de vehicles, s'han de tenir en compte totes les etapes de la seva vida útil, des de l'obtenció de les matèries primes dels seus components fins que acaba de circular i és rebutjat. Evidentment, realitzar aquests càlculs és complexa i requereix de moltes dades, a més el resultat dependrà de cada vehicle.

És per això que seguint amb la dinàmica del projecte, s'han escollit determinats models que han estat molt venuts a nivell mundial per estudiar l'impacte mediambiental que representa l'ús de cadascun. Com el consum d'energia, ja sigui fòssil o elèctrica, té una relació directa amb el pes, l'aerodinàmica i fins i tot diàmetre de rodes o superfície de contacte amb el sòl, s'agafaran models de característiques similars. (**Taula 12**).

En la següent taula, es detalla la fitxa tècnica dels vehicles escollits:

	Model 3	Golf 8 TDI	Golf 8 TSI	Golf 8 eTSI	Toyota Mirai
Propulsió	Elèctrica (dos motors)	Dièsel (2.0 TDI)	Benzina (1.5 TSI)	Híbrida	Híbrida
				Benzina (1.0 TSI)	Pila d'hidrogen
				Elèctrica	Elèctrica
Potència (CV)	480 CV – 353 kW	116 CV – 85 kW	130 CV – 96 kW	110 CV – 81,23 kW	172 CV – 128 kW

Preu	62.990	28.485	25.155	31.835	61.000
Autonomia (km) WLTP	602	-	-	56 (bateria ió-liti de 35,8 kWh)	650
	(bateria ió-liti de 85 kWh)				(bateria ió-liti d'1,24 kWh)
Consum combinat WLTP	16,2 kWh/100 km	$4,2 \frac{l}{100km}$	$5,4 \frac{l}{100km}$	$5,2 \frac{l}{100km}$	$0,798 \frac{kg}{100km}$
Emissions CO₂ WLTP ($\frac{gr}{km}$)	0	117	124	118	0
Coefficient Cx	0,23	0,28	0,28	0,28	
Pes (kg)	1.931	1.384	1.331	1.366	1.900

Taula 12 - Models per l'estudi de l'impacte ambiental. Font: creació pròpia a partir d'informació oficial.

*WLTP (Worldwide harmonized vehicle Test Procedure) és el protocol internacional que determina ells consums i emissions de cada vehicle per la seva homologació. En el cas del Tesla, les emissions dependran del **mix energètic** del país on es recarregui el cotxe, en aquest cas, Espanya. En quant al Toyota Mirai dependrà del mètode amb el que s'ha obtingut, per aquest exercici es considerarà **hidrogen verd**.

Per realitzar correctament l'estudi ACN dels vehicles escollits es desglossarà l'apartat en les tres principals etapes de la vida del producte, englobant l'extracció de la matèria primera i la fabricació en un mateix i l'ús i la gestió de residus per una altra banda. A continuació, s'elabora un esquema que comprèn les activitats contaminants al llarg de la vida útil dels vehicles. Evidentment, per estudiar de manera precisa les tones de CO₂ que emeten a l'atmosfera, a més d'altres gasos contaminants, s'haurien de tenir en compte un volum molt gran de dades, és per això que s'ha englobat les dues primeres etapes en una sola. No és possible determinar de manera precisa quanta contaminació produeix cadascun dels punts enumerats en la

Taula 13, però sí determinar valors aproximats validats per estudis d'institucions fiables.

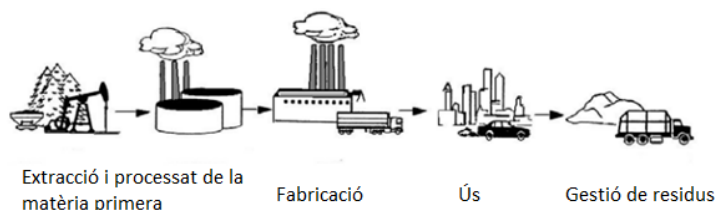
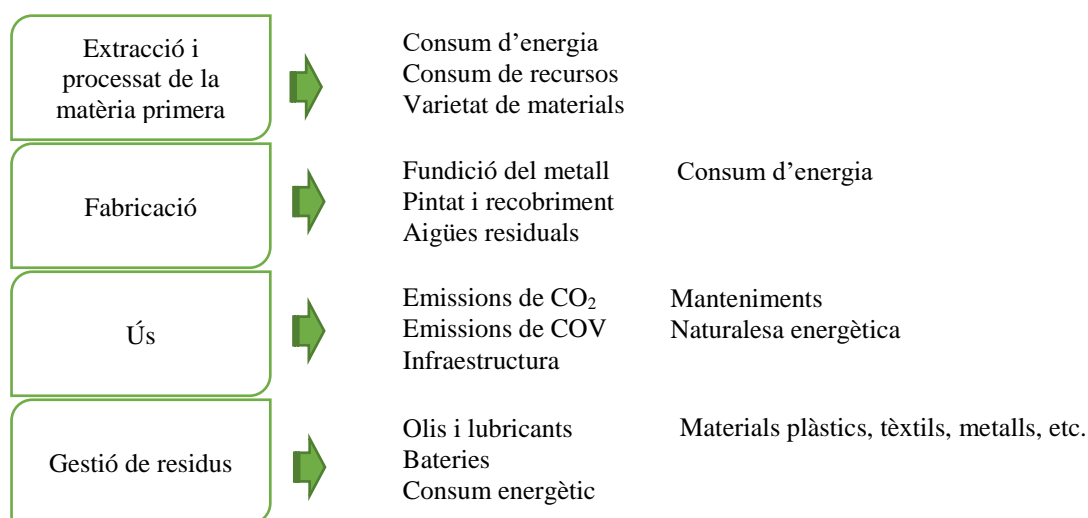


Figura 26 - Etapes de la vida útil d'un vehicle



Taula 13 - Etapes estudi ACN

1.7.1. Extracció i processat de la matèria primera i fabricació

Abans d'arribar a l'etapa de fabricació, els fabricants han d'aconseguir la matèria primera per poder fabricar els components del cotxe. Aquesta és una de les etapes més contaminants del procés i és la que a priori no consta en les dades de CO₂ a l'atmosfera que declaren els fabricants del món de l'automoció, ja que normalment tenen proveïdors als que compren la matèria primera per després fabricar els components, o directament compren els components ja fabricats a proveïdors externs.

La fabricació de tots cinc vehicles comença de la mateixa manera. Les primeres matèries s'extreuen, refinen, transporten i es transformen en diversos components que necessita la cadena de producció del cotxe, i segons fonts de l'Associació Espanyola de Fabricants d'Automòbils i Camions (Anfac), «en principi, a excepció del motor i la bateria, un cotxe convencional i el seu mateix model en elèctric tenen els mateixos components i el mateix disseny, per això el seu interior i la seva carrosseria és exacta i la seva producció contamina el mateix». (39)

Quantificar les emissions que suposa el procés de fabricació de qualsevol cotxe és quelcom molt complex i pràcticament una utopia. Per calcular-ho, s'ha de considerar la extracció i obtenció de la matèria primera, el transport fins la fàbrica i la construcció dins la pròpia

fàbrica, que depenent d'aquesta, utilitzarà més o menys fonts d'energia renovable en funció del vehicle i el mix energètic on es trobi la fàbrica.

Com la finalitat de l'estudi és treure conclusions sobre l'impacte ambiental que provoquen les diferents tecnologies, s'han agafat els valors de les estimacions en funció de la naturalesa del cotxe, i s'ha decidit desestimar dades concretes del procés de fabricació d'aquests models per tal d'evitar casuístiques puntuals i obtenir resultats basats en un marc global.

Així doncs, el gruix de dades sobre les emissions de CO₂ que implica la fabricació d'un cotxe s'han pres d'un article acadèmic titulat "*Estimation of CO₂ Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA*" (40) el·laborat per professors de La universitat de Kogakuin, Japó, junt amb enginyers de Mazda. En aquest estudi s'ha realitzat un anàlisi i recopilació d'emissions discriminant per tipus de vehicle, ús i localització geogràfica. Per altre banda, per els paràmetres que es veuen influenciats de manera directa amb el mix energètic o el petroli, s'ha basat l'estudi en publicacions del *Ministeri para la transición Ecológica y el Reto Demográfico* i la *Red Eléctrica de España*. (41) (42)

Tal i com s'ha vist a la

Taula 13, són molts els factors que s'han de considerar i aproximar, és per això que s'ha establert les següents estimacions:

Estimació comuna (5 models):

- Conjunt de carrosseria i interior. Comprèn tots els components de l'interior del vehicle així com suspensions, panells exteriors i pintura i recobriments. **4219 kg de CO₂**.

Estimació en motors de combustió (TSI i TDI):

- Conjunt motor-transmissió de benzina (*powertrain*):
 - Benzina i híbrid: **1274 kg de CO₂**.
 - Dièsel: **1539 kg de CO₂**.

Estimació en motor elèctric (Tesla Model 3 i eTSI):

- Conjunt màquines elèctriques: **1070 kg de CO₂ / unitat**.
- Inversor: **641 kg de CO₂**.

Estimació de la pila de combustible (Toyota Mirai II):

- Pila PEM 128 kW: **3.200 kg de CO₂**.
*(aproximadament 25 kg per cada kW)

Estimació en bateries de ió-liti:

- Bateria de 85 kWh (Tesla Model 3): **15.000 kg de CO₂**.
- Bateria de 35,8 kWh (Golf eTSI): **6.336 kg de CO₂**.
- Bateria de 1,24 kWh (Mirai): **219,5 g de CO₂**.
*(aproximadament 177 kg per cada kWh de capacitat).

Tal i com demostra l'estudi, la fabricació d'un cotxe elèctric és notablement més cara que la d'un cotxe de combustió, i això és degut a la fabricació de la bateria.

Un recent estudi publicat per Christoph Buchal, professor de física en el centre d'estudis CES-Ifo, Munich, ha resultat que el procés de fabricació de les bateries elèctriques és contaminant. De fet, fabricar una bateria de ió-liti, de 75 kWh com la que du el Tesla Model 3 2020 suposa una mitja d'entre **11 i 15 tones de CO₂ a l'atmosfera**, com a mínim, abans de ser posat en funcionament. Aquesta dada està reforçada per l'Institut Suec d'Investigació sobre el Medi ambient, que afirma que per dur a terme el procés de fabricació de la bateria d'un Tesla, és necessari produir unes 15,5 tones de diòxid de carboni depenent de la capacitat. Perquè ens fem una idea, seria l'equivalent a conduir un cotxe dièsel o benzina al llarg de vuit anys. (39) (40)

Les bateries fabricades per un cotxe elèctric compten amb metalls com el liti, cobalt o níquel, aquests són elements pesants, que necessiten molta energia per ser extrets de la terra, aquest és el procés on la maquinària llençarà les tones de CO₂ a l'atmosfera. A més a més, s'ha de tenir en compte que les bateries de ió-liti es fabriquen amb estructures modulars compostes per cel·les que aporten una potència a la bateria, és a dir, que contra més autonomia tingui la bateria, més haurà contaminat el procés.

Un cop contrastades les fonts de dades d'on hem conclòs les estimacions, es crea la següent taula sobre l'impacte dels 5 vehicles escollits abans de ser utilitzats:

	Model 3	Golf 8 TDI	Golf 8 TSI	Golf 8 eTSI	Toyota Mirai
Interior i carrosseria	4219	4219	4219	4219	4219
Motorització	2.140 (motors) 641 (inversor)	1539	1274	1.274 (combustió) 1.070 (elèctric) 641 (inversor)	1.070 (motor) 641 (inversor) 3.200 (Pila)
Bateries	15000	-	-	6336	219,5
Total kg de CO2	22000	5758	5493	13540	9778
	kg de CO2	kg de CO2	kg de CO2	kg de CO2	kg de CO2

Taula 14 - Impacte durant el procés de fabricació i obtenció de la matèria primera

Així doncs, tal i com veiem en el total de la **Taula 14**, el cotxe elèctric és el més contaminant amb una notable diferència seguit pel cotxe de pila de combustible i híbrid. Fet que reflexa la rellevància de l'impacte en la producció de bateries i destaca la diferència de cost per producció en funció de la capacitat d'aquesta. Per altre banda, el Toyota Mirai es veu molt afectat per la repercussió ambiental que té la pila de combustible durant el seu procés de fabricació, entre d'altres, a causa dels metalls preciosos que la componen. Destacar que Toyota no ha fet públiques les dades de contaminació d'aquest procés de fabricació i s'ha hagut de fer una aproximació segons *Simons&Bauer 2015*.

Per tant, es pot concloure que el procés de fabricació del cotxe de benzina és el que té menys repercussió al medi ambient, degut a la senzillesa de la tecnologia i a la naturalesa dels materials que necessita que componen els seus elements.

1.7.2. Ús

Un cop calculat l'impacte degut al procés de fabricació, el següent pas és calcular l'impacte de CO₂ que tindran els diferents models al llarg de la seva vida útil.

Per això, s'estableix el següent cas d'un usuari que resideix a la ciutat de Barcelona i que realitza una mitjana de 23.000 km l'any (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). El temps establert per l'estudi serà de 10 anys.

Durant la vida útil d'aquests vehicles es realitzaran diverses operacions (manteniments) bàsics que també comporten emissions de CO₂, s'han estimat seguint la mateixa font que al punt 1.7.1:

- Manteniments:
 - Substitució de pneumàtics: **108 kg de CO₂ / joc**
 - Bateria de 12 V: **19,5 kg de CO₂ /unitat**
 - Canvi d'oli: **3,22 kg de CO₂**
 - Canvi del líquid refrigerant: **7,03 kg de CO₂**

Aquests són alguns manteniments bàsics i indispensables que s'hauran de fer al vehicle al llarg de 10 anys, alguns d'ells, més d'una vegada (**Taula 15**). Clar està que es deprecien possibles averies que comportin canvis d'elements del vehicle, ja que s'hauria de veure l'impacte de cada element en qüestió. Per exemple, si al cotxe elèctric se li ha de canviar un mòdul o tota la bateria, aquest fet impactaria molt considerablement a la contribució de CO₂ llençat a l'atmosfera al llarg de la vida útil. Sí es tindran en compte, però, el canvi de bateries de 12V en els cotxes que la duen.

Tenint en compte que el nostre usuari donarà un ús intensiu anual de 23.050 km i 10 anys, es crea el següent escenari de manteniments i possibles averies dels vehicles al llarg de la seva vida útil:

	Periodicitat	Golf 8 TDI	Golf 8 TSI	Golf 8 eTSI	Toyota Mirai
Substitució de pneumàtics	<i>Cada 30.000 km</i>	756	756	756	756
Canvi d'oli	<i>Cada 20.000 km</i>	$3,22 \cdot 11 = 35,42$	35,42	35,42	-
Canvi líquid refrigerant	<i>Cada 3 anys</i>	21,09	21,09	21,09	21,09
Total kg de CO₂		851,51	851,51	851,51	777,09
		<i>kg de CO₂</i>	<i>kg de CO₂</i>	<i>kg de CO₂</i>	<i>kg de CO₂</i>

Taula 15 - Impacte ambiental manteniments i averies

Un cop establerts els manteniments de manera equilibrada entre els 5 models, arribem al punt clau de l'exercici, estudiar quant diòxid de carboni alliberem a l'atmosfera mentre fem ús del cotxe.

Per fer l'exercici més realista, es sumarà un increment del 15% en els consums WLTP, ja que tot i ser més aproximats i realistes que l'antic cicle d'homologació NEDC (*New European Driving Cycle*), segueix sense ser viable mantenir aquests consums al llarg de 10 anys, i encara menys si viatges molt per ciutat, com és el cas del nostre usuari.

Per calcular l'impacte de CO₂ a l'atmosfera a l'hora de recarregar un cotxe, s'ha de valorar d'on prové l'electricitat, ja que si tens panells fotovoltaics a casa o si la companyia elèctrica contractada es basa principalment en centrals tèrmiques o aposta per parcs eòlics... Són molt els factors que intervenen en l'impacte per obtenir un kW. Per tant, després de consultar varies estadístiques de la REE (*Red Eléctrica de España*) i tenint en compte que el nostre mercat energètic es mou cap a les energies renovables, s'estimarà el consum en **kg de CO₂ per kWh**. Per altre banda, es considerarà un impacte 0 en el procés d'obtenció de l'hidrogen degut a que prové d'energies renovables.

Fent referència al consum elèctric del cotxe híbrid, s'ha desestimat l'impacte de la recàrrega de bateria, ja que aquesta no demanda tanta energia com el cotxe elèctric i en la seva majoria de cicles de cargues és carregada gràcies al motor tèrmic i a la regeneració.

Per calcular l'impacte dels motors de combustió, s'ha de tenir en compte que a més del que contamina el vehicle per quilòmetre, hem de sumar el procés d'extracció del petroli, la seva refinació i el transport fins l'estació de servei. Aquests processos són molt contaminants i van des de els processos al pou de petroli (venteig i crema de metanol), transport en petrolers i tractament a la refinaria. Per obtenir una dada fiable de l'impacte ambiental de la benzina, s'han pres els següents Factors d'Emissió del Ministerio de Transición Ecológica: (45)

- FE benzina (2018): **2,157 kgCO₂/l**
- FE gasoil (2018): **2,493 kgCO₂/l**

1.7.3. Gestió de residus

Per últim, hem de tenir en compte el cost que suposa per al medi ambient el procés de rebuig d'un vehicle.

En aquest apartat s'ha de contemplar des del transport del vehicle, col·lecció i destrucció (separar el motor, dipòsit, líquids, pneumàtics, etc.), empaquetament de la deixalla o crematori. Aquests tipus de residus es regeixen pel *Real Decreto 265/2021, de 13 de abril, sobre los vehículos al final de su vida útil y por el que se modifica el Reglamento General de Vehículos, aprobado por el Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre*.

Segons la Setmana Europea de la Prevenció de Residus, gairebé el 90% d'un vehicle és reciclable, però quant es recicla en realitat? En definitiva, per cuidar el planeta és indispensable reciclar el plàstic, però també ho és fer-ho amb les altres parts del vehicle, com ara els metalls emprats.

Es poden distingir entre els residus perillosos i els no perillosos que podem reciclar.

Residus Perillosos:

- Gasos. Si resulten perillosos per la capa d'ozó es destrueixen, sinó, s'extrauen es purifiquen i es reutilitzen.
- Líquids. Segons d'on provenen, poden ser reciclats i regenerats, pel contrari s'aboquen a uns contenidors especials.
- Filtre d'oli. Es separen els components per poder-lo reciclar: per una banda la part metàl·lica i per l'altre el filtre, per finalment reciclar-lo com a paper.
- Bateries. En cas que siguin bateries d'àcid, s'ha de separar per reutilitzar-lo o destruir-lo. Un cop separats, es recicla els materials de les plaques i el plàstic per separat. En el cas del liti, es recicla mitjançant el procés de Lixiviación, que consisteix en, mitjançant l'ús d'àcids, dissoldre els components de les bateries per reutilitzar-los (els aprofitables) per separat.

Residus no perillosos:

- Plàstics. Alguns es reutilitzen com a peces de recanvis per altres cotxes i altres que no es poden aprofitar es reciclen per elaborar productes nous.
- Alumini. Al reciclar aquest element es tornarà a convertir en el mateix component-
- Pneumàtics. La crema d'aquests és altament contaminant. Es poden reciclar i reutilitzar per crear molts altres materials.

- Cables. El metall es separa del plàstic i es reciclen per separat, convertint-los en nous conductors de corrent reutilitzables.
- Vidres. Són reciclables i reutilitzables en vehicles nous o altres usos.

El que més s'aprofita d'un vehicle a l'hora de reciclar-lo i donar una segona vida als elements, són la xapa, acer i metalls, que es reciclen fins a un 75%. (46) En segon lloc es reaprofiten els papers i cartró del cotxe, que normalment s'utilitzen per produir energia en un 1%. En quant a l'anticongelant i el líquid de frens signifiquen també un 1% del total de reciclatge d'un cotxe.

Per altre banda, els pneumàtics i altre peces de cautxú s'aprofiten en un 4%, mentre que els plàstics són reaprofitables en un 3,5-5,5%. Per últim, el vidre només representa un 3,5% del reciclatge total del vehicle. En quant a l'interior del vehicle (carrosseria i elements tèxtils) no s'aprofiten massa i normalment es llencen directament a la deixalla. En concret, s'aprofita un 1,2% com a valor energètic.

Per últim, la resta de materials i peces del vehicle són més difícils de reciclar. Però tal i com s'ha demostrat, el percentatge d'elements reciclables pot superar de sobres el 50%, però està clar que molts d'aquests processos no resulten rentables a nivell econòmic i que moltes deixalleries reaprofiten un percentatge molt més baix d'elements i, la resta, és rebuig. (46)

A banda d'aquests elements i per crear una aproximació de l'impacte ambiental que desencadena el rebuig d'un cotxe, s'ha de tenir en compte el reciclatge de les bateries de liti. Actualment el reciclatge de les bateries de liti consisteix en el reaprofitament del Cobalt, extraient-lo en forma de òxid de cobalt i liti, ja que surt molt més rentable que extreure només el liti ja que el preu per kg és molt més baix. Degut al baix cost del liti, les bateries utilitzades són molts cops emprades simplement per reomplir el formigó, impossibilitant la seva reutilització. Aquest mètode de rebuig comporta els seus riscos ja que les bateries contenen àcids i àlcals que poden actuar com electròlits en funcionament. Per tant, ningú assegura que no pugui haver lixiviació interna dins les bateries (dissolució), un cop aquestes estan enterrades i puguin filtrar-se a la terra fins arribar a capes subterrànies o aqüífers.

A banda del que succeeixi en la majoria de processos de reciclatge i que fins ara no se l'hi hagi donat la importància al reciclatge del liti que realment mereix, la resposta a si una bateria de liti és reciclable és rotundament sí. Recentment s'ha aconseguit arribar a un mètode que funciona amb temperatura ambient i no mitjançant la fundació com es feia amb

les antigues bateries de plom. D'aquesta manera s'arriba a aprofitar fins un 70% d'eficiència utilitzant només processos mecànics. La preparació mecànica de les bateries de ió-liti és una feina difícil degut a la inflamabilitat de l'electròlit i la perillositat d'alguns ingredients com el liti en contacte amb entorns humits.

Per garantir una preparació segura, l'empresa Duesenfeld (Wendeburg, Alemanya) ha desenvolupat i plantejat el procés i la maquinària per reciclar bateries de liti de vehicles, al mateix temps que elimina els riscos del procés. (Figura 27)

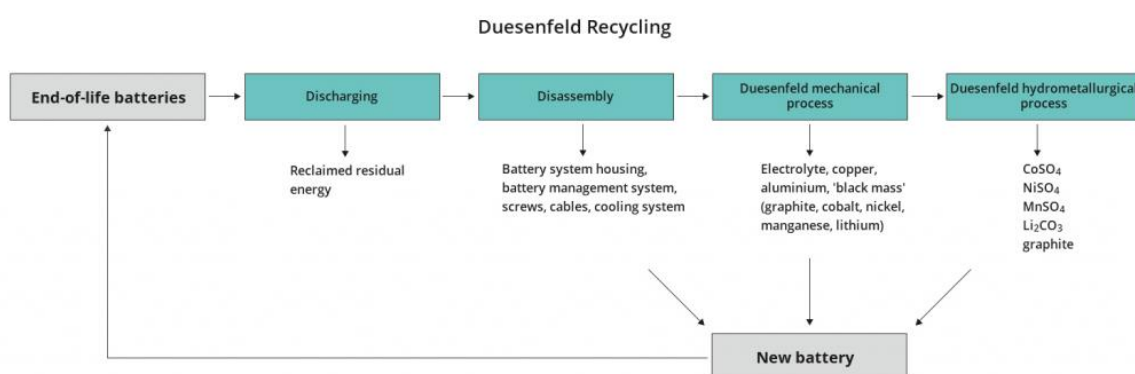


Figura 27 - Reciclatge bateries vehicles elèctrics Duesenfeld

Com a conclusió s'ha demostrat que més de la meitat d'elements dels vehicles que són rebutjats es poden reciclar, en concret un 88%, tot i que la realitat és una altre. Segons la legislació europea, tots els països que la formen estan compromesos a assegurar que el 85% de la massa del vehicle sigui reaprofitada com a combustible o almenys per generar energia. En quant a les bateries, són l'element més complex de reutilitzar i que fins ara ha provocat més impacte mediambiental, tot i que hi ha molts descobriments i mètodes nous que ja s'estan implantant en el marc europeu per tractar-les i donar-les un segon ús.

Per últim i seguint amb el cas pràctic, es fa la següent estimació per tots 5 models sobre el cost mediambiental que genera el procés de reciclatge i deixalleria:

- Reciclatge i deixalleria: **65 kg de CO₂**.

Tot i que sabem que les bateries de liti en l'actualitat no estan sent reaprofitades, no es considera l'impacte ambiental que té el rebuig d'aquestes, atribuint així el mateix impacte ambiental en el procés de rebuig per tots els models.

1.7.4. Càlcul del cas pràctic

Un cop definides les estimacions en totes les etapes de vida útil d'un cotxe, es demostren les següents fórmules que compondran els gràfics resultants:

- Vehicle elèctric i de pila d'hidrogen:

$$I_{veh}(t) = t \cdot \left(23050 \frac{km}{12 \text{ mesos}} \cdot \frac{C_{WLTP}}{100 km} \cdot FE \right) + I_{prod} \cdot 1_t(t \geq 0) + I_{rebuig} \cdot 1_t(t \geq T) \quad (\text{Equació 23})$$

- Vehicles de combustió interna:

**En aquest càlcul també es té en compte el FE del carburant.*

$$I_{veh}(t) = t \cdot \left[23050 \frac{km}{12 \text{ mesos}} \cdot \left(\left(\frac{C_{WLTP}}{100 km} \cdot FE \right) + (E_{WLTP}) \right) \right] + I_{prod} \cdot 1_t(t \geq 0) + I_{rebuig} \cdot 1_t(t \geq T) \quad (\text{Equació 24})$$

On:

I_{veh} – Impacte total del vehicle al llarg de la seva vida útil. [kgCO₂]

I_{prod} – Impacte en la fabricació i obtenció de la matèria. [kgCO₂]

I_{rebuig} – Impacte de rebuig del vehicle. [kgCO₂]

t – Variable de temps [mesos]

C_{WLTP} – Consum combinat + 15% [l]o[kWh]

FE – Factor d'emissió del combustible + 15% [kg CO₂/l] o [kg CO₂/kWh]

E_{WLTP} – Emissió del vehicle [kg CO₂/km]

T – 10 anys

Degut a que el plantejament del problema suposa que al cap de 10 anys de vida útil es considerarà el rebuig dels vehicles, s'han afegit dues **funcions indicatrius** per tal de tenir en compte l'Impacte en la producció per temps més grans que 0, i només considerar l'Impacte en el rebuig quan el temps arriba als 10 anys.

Per altre banda, s'han sumat els manteniments segons la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*, on s'indiquen, en funció dels quilòmetres, els kg de CO₂ avocats a

l'atmosfera en fer cada revisió. Per tal de no crear funcions per parts per poder sumar els impactes quan toquen i que es vegin reflectits en el gràfic, s'ha calculat l' I_{veh} en funció dels mesos, sumant l'impacte en els manteniments en els mesos que pertoca. És per això que la **Figura 28** no és del tot lineal sinó que té petites pujades degut a la consideració dels manteniments en cada vehicle.

Manteniments	Model 3	Golf 8 2.0 TDI	Golf 8 1.5 TSI	Golf 8 eTSI	Mirai 2020
10.000					
20.000		3,22	3,22	3,22	
30.000	108	108	108	108	108
40.000		3,22	3,22	3,22	
50.000	97,5	97,5	97,5	97,5	
60.000	108	111,22	111,22	111,22	108
70.000	7,03	7,03	7,03	7,03	7,03
80.000		3,22	3,22	3,22	
90.000	108	108	108	108	108
100.000	97,5	100,72	100,72	100,72	
110.000					
120.000	108	111,22	111,22	111,22	108
130.000	7,03	7,03	7,03	7,03	7,03
140.000	97,5	100,72	100,72	100,72	
150.000	108	108	108	108	108
160.000		3,22	3,22	3,22	
170.000					
180.000	108	111,22	111,22	111,22	108
190.000	97,5	97,5	97,5	97,5	
200.000	7,03	10,25	10,25	10,25	7,03
210.000	108	108	108	108	108
220.000		3,22	3,22	3,22	
230.000	97,5	97,5	97,5	97,5	

Pneumàtics	Bateria 12 V	Canvi d'oli	Canvi líquid refrigerant
------------	-----------------	----------------	-----------------------------

Taula 16 - Taula de manteniments

Tenint en compte totes les variables i estimacions que s'han nombrat sobre els diferents estats de la vida útil del vehicle, es crea un gràfic per comparar l'impacte al llarg de 10 anys dels 5 models:

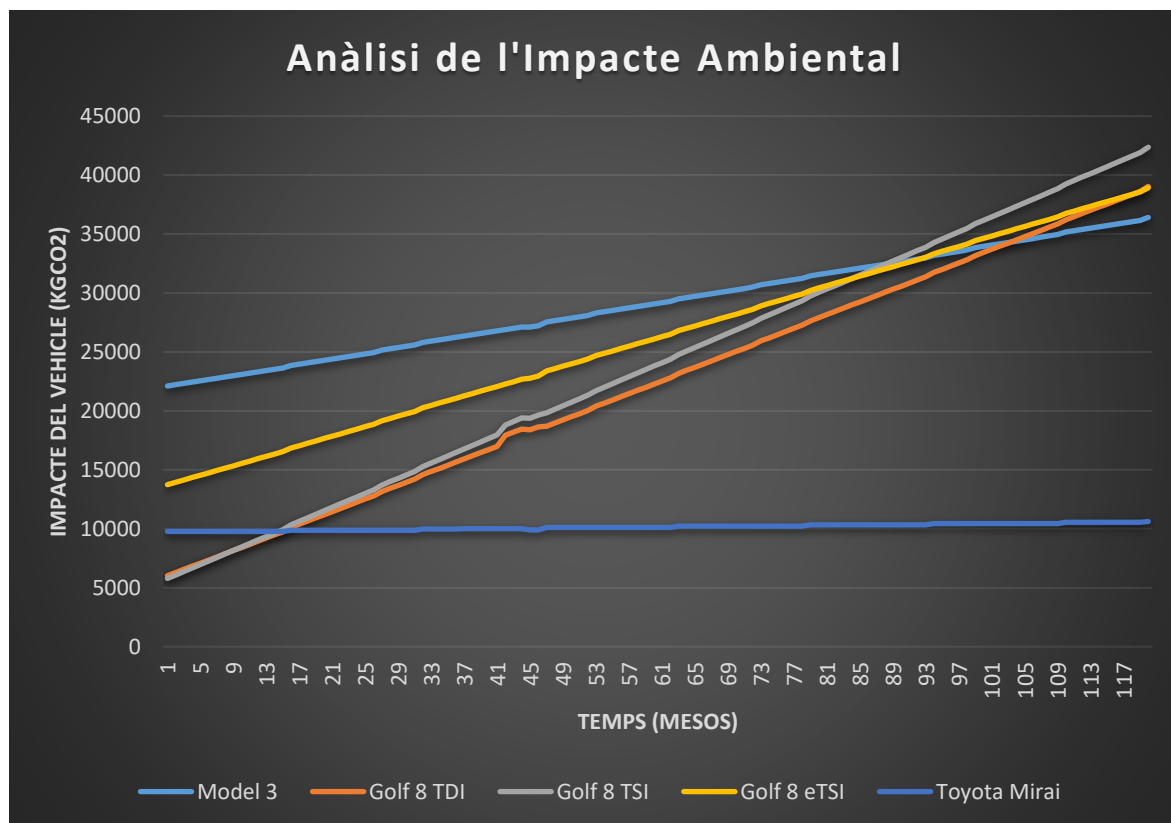


Figura 28 - Gràfic comparatiu impacte ambiental

Tal i com s'havia esmentat en el plantejament del cas pràctic, s'ha considerat que el vehicle amb pila d'hidrogen funciona amb hidrogen verd, és per això que la seva funció lineal és gairebé plana, acabant amb un Impacte total al llarg de la seva vida útil de **10621 kgCO₂**. Comparant-lo amb la resta de models, aquests tenen molta més pendent en les seves funcions degut als Factors Energètics dels carburants o del mix energètic espanyol, en el cas del Tesla Model 3. El vehicle elèctric comença amb un gran impacte ambiental degut a la fabricació de la bateria, que té un impacte de 15 tones de CO₂, i després es recupera degut a la poca impacte que representa l'energia elèctrica respecte als carburants, quedant així en segona posició per darrera del Toyota Mirai.

Veient els resultats, una de les conclusions que podem treure és que el vehicle elèctric no és tant respectuós amb el medi ambient com ens sembla, i és un fet. Molts estudis confirmen

que degut a l'impacte en la producció de les bateries i tenint en compte el mix energètic dels països europeus, un cotxe elèctric amb pocs anys o km de vida útil, haurà tingut més impacte per km que qualsevol de combustió interna. A més, hem de tenir en compte que la vida de les bateries és limitada i que si realment poséssim en pràctica aquest cas, molt probablement la bateria no aguantaria els més de 200.000 km que haurà recorregut al cap de 10 anys. Per contra, sí és cert que el cotxe elèctric és clarament més net i ajuda a tenir una atmosfera més sana a les grans ciutats, ja que en el cas del dièsel, tot i no destacar per les tones de CO₂ avocades per la combustió, llença moltes més partícules nocives com en NO_x, CO que són directament perjudicials per la ciutadania.

Per tant, al cap de 10 anys, l'Impacte total dels vehicles, serà el següent:

Model 3		Golf 8 TDI		Golf 8 TSI	
<i>t</i> (mesos)	<i>Impacte TOT</i> (kgCo2)	<i>t</i> (mesos)	<i>Impacte TOT</i> (kgCo2)	<i>t</i> (mesos)	<i>Impacte TOT</i> (kgCo2)
1	22109,05517	1	6023,99462	1	5788,899639
2	22218,11034	2	6289,98924	2	6084,799279
	[...]		[...]		[...]
118	36035,59988	118	38347,87515	118	41611,66745
119	36144,65504	119	38613,86977	119	41907,56709
120	36416,21021	120	39042,36439	120	42365,96673

Golf 8 eTSI		Toyota Mirai	
<i>t</i> (mesos)	<i>Impacte TOT</i> (kgCo2)	<i>t</i> (mesos)	<i>Impacte TOT</i> (kgCo2)
1	13824,94028	1	9778,5
2	14109,88055	2	9778,5
	[...]		[...]
118	48365,46259	118	10555,59
119	48650,40287	119	10555,59
120	49097,84315	120	10620,59

Així doncs, considerant aquesta fotografia final, el vehicle amb pila d'hidrogen seria amb una àmplia diferència el més amigable amb el medi ambient, seguit de l'elèctric, i posteriorment el dièsel, híbrid i benzina.

Conclusions

Per sintetitzar la viabilitat de l'aplicació de l'hidrogen a l'automoció és indispensable nombrar la situació de la seva infraestructura i el seu cost. Tal com s'ha demostrat en aquest estudi, la infraestructura és escassa i no és accessible als usuaris a Espanya i a Europa. Aquesta mancança és el principal inconvenient per poder comercialitzar automòbils propulsats per aquest combustible.

Així i tot, el futur del sector augura cap a la supressió d'aquesta dificultat actual. Són moltes les propostes reals a l'àmbit europeu i regional que recolzen la producció i la distribució de l'hidrogen verd per ser utilitzat en l'automoció. A més a més, grans empreses estan fent una aposta clara pel creixement d'aquesta indústria, fet que constata que aquesta tecnologia serà una realitat en els anys vinents.

En l'aspecte econòmic, és cert que és una tecnologia amb un preu elevat sobretot pels materials que necessita i la pobra amortització que s'ha aconseguit fins a la data. A més a més, també juga un factor crucial la inversió dels fabricants en el procés de construcció del vehicle. Tanmateix, el preu no s'allunya en excés del valor de la majoria de cotxes elèctrics. El futur de la pila d'hidrogen també es demostra a través de les investigacions involucrades, moltes de les quals amb resultats palpables. La confiança en aquesta nova font d'energia fa que el sector està centrat en la possibilitat d'abaratir costos i la millora de la seva eficiència. Un altre punt que reflecteix que serà una energia necessària en els propers anys és la seva aplicació al transport terrestre pesat –en la qual no s'ha focalitzat aquest estudi–. A diferència de l'elèctrica, la pila d'hidrogen pot utilitzar en aquest tipus de transport imprescindible a l'actualitat. L'aplicació de la nova font d'energia suposaria un gran canvi en l'impacte ambiental del transport a l'àmbit mundial.

Per altra banda, és imprescindible remarcar que la tecnologia de pila d'hidrogen aplicada a un cotxe no deixa de ser una font d'energia elèctrica, que s'usa per fer funcionar el motor i la resta d'elements elèctrics del vehicle. Per tant, comparteix els avantatges d'eficiència que presenten els cotxes elèctrics sense dependre de la càrrega ni de les grans bateries de liti, que són costos i contaminants.

En l'estudi de l'aplicació de l'hidrogen als motors de combustió interna –que està en una etapa de desenvolupament– s'ha demostrat que és una alternativa viable i neta respectar els

motors de combustió interna. No obstant això, té un consum més elevat d'hidrogen que la pila de combustible i, en base a l'actual cost per quilogram de l'hidrogen, és una alternativa poc viable a curt terminis.

Més enllà de les conclusions de cada tipus d'aplicació, l'argument de major pes per apostar per la pila d'hidrogen en el futur és el seu paper en el medi ambient. L'anàlisi de l'impacte demostra que és una tecnologia amb impacte ambiental 0 durant la seva vida útil i que no existeix una tecnologia més neta que aquesta en l'automoció.

Tot i que els principals fabricants reconduïxen el parc d'automòbils cap a la mobilitat 100% elèctrica, s'ha demostrat que tenen un gran impacte ambiental en el procés de fabricació, a més de la contaminació que produeix cada càrrega en dependència del mix energètic de cada país.

Per això, el projecte conclou que la pila d'hidrogen és una alternativa infravalorada en el panorama actual que hi ha un desconeixement real sobre la tecnologia. La rapidesa del mercat actual i la necessitat de vendre automòbils fa que es busquin alternatives sostenibles que puguin llençar de manera immediata, creant una realitat que reflecteix –erròniament– que el futur de l'automoció està exclusivament en mans del cotxe elèctric.

Així, l'automobilisme està migrant cap a una tecnologia que cada cop serà més cara i escassa i que, sobretot, té una vida finita. Per això és necessari veure l'hidrogen verd com una alternativa viable per la qual, a través d'una inversió global i efectiva, el futur pot dirigir cap a una reducció significativa del cost ambiental del sector.

1.8. Anàlisi econòmic d'una hidrogenera

1.8.1. Resum executiu

Per tal d'analitzar el cost que suposa crear una infraestructura orientada a abastir el parc de vehicles propulsats per hidrogen, en aquest cas pràctic es realitza el **pla d'empresa d'una hidrogenera a Barcelona anomenada Blue 2 Energy (B2E)**.

Tal i com hem vist a l'apartat **1.3** el principal inconvenient per la comercialització dels cotxes amb pila d'hidrogen és la infraestructura actual a Europa per aconseguir el carburant. El juliol de 2021, la Unió Europea en el seu pla de descarbonització va determinar que tots els països que la componen, en 2035, hauran de tenir una estació de servei d'hidrogen cada 150 quilòmetres. Aquest fet suposa una clara aposta per aquest combustible i la tecnologia que l'utilitza. En paral·lel, aquest és el mateix any escollit per deixar de vendre vehicles amb qualsevol motor de combustió interna. Davant d'aquest escenari i si es compleixen amb les dates pactades, a partir de 2035 només serà possible comprar cotxes elèctrics o d'hidrogen. (47)

Està clar que muntar estacions de càrrega per alimentar als vehicles elèctrics és relativament senzill i econòmic, ja que els carregadors els pots connectar directament a la xarxa d'electricitat i només necessites la inversió per muntar un punt de càrrega. En el cas de l'hidrogen, en canvi, el procés és molt més complex. Són moltes les variables a tenir en compte per crear un pla de negoci així, és per això que analitzarem per una banda el cost de l'hidrogen i per l'altre el negoci de la hidrogenera en sí, per acabar traient conclusions sobre quant es trigarà a produir-se el retorn de la inversió en funció de la quantitat d'hidrogen que s'aconsegueixi vendre i el preu d'aquest.

Tot i que només s'ha construït una quantitat moderada d'hidrogeneres a nivell mundial a la darrera dècada, el nombre de noves estacions de servei d'aquest tipus que obren any rere any incrementat paulatinament durant aquests últims, destacant en aquest aspecte països com a Estats Units, Japó, Alemanya i Dinamarca. El desenvolupament d'aquesta infraestructura és fonamental per poder donar resposta i afavorir el creixement en la fabricació i comercialització de la flota de vehicles amb pila de combustible els quals, per altra banda, es van fent cada cop més assequibles per a la butxaca dels consumidors.

Una estació de proveïment d'hidrogen consta de diversos elements que fins ara s'han estat tractant com a instal·lacions independents en no existir una regulació específica:

- Producció – Regulació d'indústria química
- Compressió – Regulació d'equips de pressió
- Emmagatzematge – Regulació d'emmagatzematge de productes químics
- Distribució mitjançant assortidors – Diferents normes internacionals

El gran avantatge de l'hidrogen respecte a altres combustibles és que pot ser produït a la pròpia estació de servei, bé mitjançant reformat d'altres hidrocarburs, bé mitjançant electròlisi la única matèria primera necessària és aigua i electricitat. Alhora, l'electricitat necessària per realitzar aquest procés pot ser obtinguda a partir de fonts renovables, facilitant la independència energètica i garantint un procés net i sense emissions. (48)

1.8.2. Estudi de mercat

Per analitzar correctament el sector de l'hidrogen a Espanya i les condicions que l'envolten, es posaran en context els següents punts:

- **Condicions culturals**

La situació cultural de l'hidrogen en l'actualitat és un dels principals inconvenients ja que hi ha una desinformació general d'aquest element. Per una banda està la gent completament desinformada del tema, que no atribueix a l'hidrogen com a un possible combustible en l'automoció i desconeix com s'obté, s'emmagatzema i s'utilitza. Per una altre banda hi ha un segon grup de persones que han escoltat parlar del tema però que no assimilen que aquesta sigui una tecnologia aplicable actualment, ho veuen viable en un futur llunyà. Per últim, el grup minoritari de persones que sí saben del tema i estan informats de les aplicacions que té l'hidrogen i, sobre tot, les aplicacions en el món de l'automoció.

- **Condicions econòmiques**

Per poder obrir una hidrogenera es requereix una gran àrea on construir una planta de tractament i producció i posteriorment la distribució i el proveïment. Tal i com s'ha esmentat, en aquest estudi econòmic només tractarem la part de proveïment, arribant a certes suposicions sobre el preu de l'hidrogen (1.8.5.1.2). Per obtenir hidrogen a partir de l'electròlisi és necessària molta energia elèctrica, i tal i com hem vist a l'apartat 1.2.3 el color de l'hidrogen dependrà de l'origen de l'energia elèctrica amb el que s'ha obtingut, en el cas d'aquesta hidrogenera, serà **hidrogen verd**. Per altre banda, la ubicació de l'estació de servei estarà a un espai a prop de la societat, dins de Barcelona, per donar facilitats al consumidor final i a l'hora donar a conèixer el nostre combustible.

- **Condicions legals**

Actualment el sector s'està trobant amb serioses barreres administratives per posar en marxa projectes d'aquest tipus, ja que la producció d'hidrogen, sigui quin sigui el mètode de obtenció o volum d'emmagatzematge i sigui quin sigui el seu propòsit, està considerada com a activitat industrial dins del segment d'indústria química, amb les conseqüències que es descriuen a la part corresponent a la Producció d'Hidrogen d'aquest document, és a dir, restriccions per situar aquests electrolitzadors en sòl que no sigui qualificat com a industrial i obligatorietat de llargues tramitacions administratives per estar sotmeses aquestes instal·lacions al règim d'autorització ambiental integrada.

Més enllà del que s'ha dit, actualment s'està tramitant una modificació del Reial decret 919/2006 que aprova el reglament sobre instal·lacions de combustibles gasosos en què s'amplia l'àmbit de aplicació del mateix també a l'hidrogen en fase gasosa.

Així mateix, la Instrucció Tècnica Complementària ITC-ICG 05 sobre estacions de servei per a vehicles de gas, pertanyent a l'esmentat reglament, també s'està modificant per tal d'incloure el hidrogen en fase gas per a la seva utilització com a carburant per a vehicles de motor, de manera que existeixi una regulació bàsica d'aquest tipus d'estacions de servei que simplifiqui allò que existeix.

La modificació introduïda es recolza en el que estableix la directiva 2014/94/UE del parlament europeu i del consell de 22 d'octubre del 2014 relativa a la implantació d'una infraestructura per als combustibles alternatius i en els seus reglaments delegats, els quals són aplicables directament.

Actualment, el que recull el Reial decret 639/2016, de 9 de desembre, pel qual s'estableix un marc de mesures per a la implantació d'una infraestructura per als combustibles alternatius, i que transposa la directiva esmentada, estableix les especificacions tècniques que una hidrogenera ha de complir avui dia:

- Norma ISO/TS 20100 relativa al subministrament d'hidrogen gasós
- Norma ISO 14687-2 relativa al grau de puresa que ha de complir l'hidrogen
- Norma EN ISO 17268 relativa als dispositius de connexió per al subministrament d'hidrogen gasós a vehicles de motor

No obstant això, la Comissió Europea acaba de publicar un nou reglament derivat de la directiva de combustibles alternatius ((UE) 2019/1745 de 13 d'agost de 2019), en què se substitueixen algunes de les normes tècniques esmentades a dalt. En concret:

- Norma EN 17127 relativa a punts de recàrrega d'hidrogen a l'aire lliure, en substitució de la
- ISO/TS 20100, i que es complementaria amb la ISO/TS 19880-1 sobre estacions de servei de hidrogen gasós.
- Norma EN 17124 relativa a especificació de producte i assegurement de la qualitat, a substitució de la ISO 14687-2.

Aquestes noves normes passen a ser aplicable a partir del 12 de novembre de 2021, sent de aplicació avui en dia les normes esmentades en primer lloc. (48)

A banda del marc legal que envoltarà el projecte, encara s'hauran de demanar més permisos, com la **licència d'obres i la licència d'obertura** a l'ajuntament de Barcelona.

Un cop aconseguit les llicències pertinents i creat el projecte de construcció, aquest s'haurà de presentar a la Direcció General de Carreteres (DGC) perquè valori el projecte complet amb tota la documentació oficial. Si aquest organisme accepta el projecte, l'empresa obtindrà una autorització provisional per començar les obres.

Un cop les obres ja estiguin acabades, s'haurà de sol·licitar de nou la aprovació a la DGC abans de l'obertura definitiva de la hidrogenera.

Amb tots aquests passos ja quasi hauríem acabat amb el procés de llicències per la nostre estació de servei, només quedaria un altre tràmit. Un cop el projecte estigui consolidat i aprovat per la DGC, s'haurà d'obtenir una autorització de la comunitat autònoma i donar-se

d'alta al Registre Territorial d'Indústria, demostrant que hi ha un contracte de subministrament de, com a mínim, 3 anys.

Un cop tots els tràmits estiguin validats, ja només quedaran els permisos petits, com ara la certificació dels assortidors, gestió de residus, legalització del personal, etc.

- **La competència**

Els principals competidors que ens trobem són grans empreses orientades al món del petroli i/o de l'energia, com per exemple Iberdrola, Repsol, Shell, etc. Aquestes han tingut un cert domini del mercat dels carburants a Espanya en els darrers anys i ja també estan apostant per la transició energètica amb estudis i inversions en plantes de producció d'hidrogen. La competència més directe amb la que ens trobem és el cas de la hidrogenera d'hidrogen verd que va obrir Iberdrola a l'any 2021 a la Zona Franca de Barcelona. Aquesta subministra hidrogen verd a tot tipus de clients, entre ells a la TMB, que va comprar 8 autobusos que funcionen amb pila d'hidrogen d'última generació. (49)

Respecte la resta de competidors, tot i que encara segueixin centrats en assumptes petrolífers, estan dedicant moltes inversions econòmiques a la recerca i infraestructura de l'hidrogen. Aquesta competència és altament perillosa a l'hora de competir contra empreses més petites ja que tenen molts més recursos econòmics i et podran mantenir preus inferiors en cas que els interessi.

- **Possibles prescriptors**

Són moltes les empreses involucrades en el món de l'hidrogen i a la vegada interessades en que aquesta infraestructura creixi en una ciutat com Barcelona. Per una banda estan les marques del món de l'automoció, marques involucrades en aquesta tecnologia com Toyota, Hyundai o BMW que podrien estar interessades en promocionar la estació de servei com a mesura de *màrketing* i publicitat. Per altre banda estarien les empreses del mercat energètic o fins i tot de l'estat espanyol, empreses com Iberia, Navantia, Sidenor, CSIC, Associació Espanyola d'Hidrogen, etc. Aquestes empreses estan decidides a situar a Espanya com una principal potència europea de l'hidrogen renovable i podrien estar interessades en col·laborar en aquest projecte. A més, degut a que l'hidrogen no es produirà a l'estació de servei, es necessita un proveïdor d'hidrogen verd que abasteixi la nostra hidrogenera. **(1.8.4.1)**

- **Client objectiu**

Al tractar-se d'una hidrogenera situada al mig d'una gran ciutat, els principals clients que es busca atraure són particulars que vulguin carregar el seu vehicle d'hidrogen. La principal avantatge amb la que es compte a dia d'avui és que en tota Barcelona només hi ha una hidrogenera en funcionament i aquesta està fora de la ciutat, fet que dificulta la venda als usuaris particulars. Per tant, en aquest sentit, hi ha poques empreses que lluitin contra la nostra en la corba d'oferta. Per altre banda, també es pot comercialitzar proveïnt a empreses, organitzacions i a la indústria. Per això seria necessari un camió amb un gran tanc d'hidrogen per actuar com a distribuïdors a la indústria propera i, fins i tot, a nivell nacional. Per últim, un altre potencial comprador es la indústria marítima, que ja s'està reconvertint i utilitzant l'hidrogen cada cop més. Al estar situats a Barcelona tenim la avantatge de comptar amb un gran port internacional on és possible donar a conèixer la nostra empresa i cada cop crear una borsa de clients més grans.

Tot i que no únicament es buscaran clients particulars, el principal mercat que es pretén reconvertir i amb el que fer negoci, segueixen sent els usuaris. En línia amb el que s'ha comentat en l'apartat de condicions culturals, hi ha un desconeixement d'aquest carburant i aquest és un tòpic amb el que s'haurà de lluitar. Actualment el preu de l'hidrogen és força elevat i la varietat de vehicles en venda que duguin aquesta tecnologia és petit, tot i que s'espera que es llencin nous models al mercat en els propers anys. Per tant, existeix un repte de reconvertir als usuaris perquè confiïn en aquesta tecnologia per sobre de les demés. De totes maneres, tal i com s'ha esmentat a l'inici de l'apartat **1.3.1.3**, el parc de cotxes a Europa s'ha de reconvertir i té com a data límit per acabar amb els motors de combustió 2035. Per tant, sí hi ha una clara necessitat del consumidor que necessita vehicle a la seva vida quotidiana de migrar de tecnologia i adaptar-se a una mobilitat més sostenible. En paral·lel a tot això, el preu dels carburants està pujant de manera exponencial i degut a que cada cop queden menys reserves, seguirà fent-ho, un altre motiu per confiar en una font renovable de combustible.

1.8.3. Anàlisi DAFO

L'anàlisi DAFO és una tècnica indispensable per analitzar i posar en el context actual del mercat a l'empresa que es pretén crear. Aquesta eina ajuda a entendre de manera visual la situació del negoci i de la competència.

Mitjançant un anàlisi de l'entorn extern i les característiques internes previstes pel negoci, aquesta eina ens ajudarà a comprendre els següents punts clau:

- **Debilitats:** aspectes limitadors de la capacitat de desenvolupament del negoci degut a les característiques internes.
- **Amenaces:** factors externs que poden arribar a impedir l'execució del plantejament empresarial o posar en perill la viabilitat del negoci.
- **Oportunitats:** són aquells factors externs a l'empresa que afavoreixen el seu desenvolupament i aporten noves vies de negoci.
- **Fortaleses:** conjunt de recursos interns, posicions de poders, i avantatges competitives del nostre negoci.

<p style="text-align: center;">Debilitats</p> <ul style="list-style-type: none"> -Limitada cartera de clients. -Dependència de subministrament i cadena logística -Desconeixement públic. -Cost de la matèria primera. -Costs de manteniment elevats. 	<p style="text-align: center;">Amenaces</p> <ul style="list-style-type: none"> -Moltes empreses interessades. -Empreses no interessades. -Competència directa per zona. -Descobriments d'un producte alternatiu.
<p style="text-align: center;">Fortaleses</p> <ul style="list-style-type: none"> -Hidrogen 100% verd. -Proveïdor fiable i reconegut. -Transparència empresarial i del producte. -Dependència dels consumidors. -Interès d'altres organismes cap a la nostra empresa. 	<p style="text-align: center;">Oportunitats</p> <ul style="list-style-type: none"> -Ajudes econòmiques i reducció d'impostos. -Pioners a la zona interurbana de Barcelona, poca competència. -Innovació. -Contribueix clarament a la transició energètica.

Taula 17 - Anàlisi DAFO

1.8.4. Anàlisi intern

L'anàlisi intern pretén abordar totes les variables a tenir en compte posteriorment en el pla financer (1.8.5), aquest engloba els recursos interns amb els que s'haurà de comptar per poder obrir l'estació de servei i els recursos materials, immaterials i de capital humà necessari.

1.8.4.1. Estratègia de recursos materials

Com a empresa que subministra productes i serveis, sempre s'ha de garantir la correcta disponibilitat d'aquests de cara als nostres clients. A banda d'això i en línia amb la proposta de valor que pretén donar la companyia, hem de mantenir present els valors de qualitat que volem demostrar en els nostres productes i plataformes virtuals.

- **Localització i instal·lacions**

La localització de la hidrogenera és una variable essencial en l'estratègia tant de recursos materials com de *màrketing* empresarial. Per una banda, el fet de dependre d'una empresa que produeixi hidrogen i ens el subministri fa que sigui més econòmic i fàcil estar en una ciutat com Barcelona, ja que té una important infraestructura terrestre i marítima per obtenir la matèria primera. Aquest mateix argument també ens serveix per obtenir de manera més econòmica els productes que es vendran a la botiga de l'estació, així com tenir un volum més gran de possibles clients.

La ubicació seleccionada per obrir la nostra hidrogenera serà al parc de la platja de la Mar Bella, concretament a l'esplanada que està a la Av. Del Litoral i connecta amb Selva de Mar.

Figura 29.

Aquesta esplanada és propietat de l'Ajuntament de Barcelona, per tant, per aquest anàlisi suposarem que l'Ajuntament ens cedeix el terreny amb un contracte inicial de 10 anys de lloguer amb la finalitat de promoure l'ús de l'hidrogen en l'automoció. Els costos del contracte seran d'un valor fix mensual de 2.500 euros, aquest és un preu molt reduït per la privilegiada ubicació en qüestió, que s'ha acceptat amb la finalitat de reduir el preu final del carburant i fer-lo més accessible als usuaris.

Dins aquesta localització es trobarà l'estació de servei, la oficina i la botiga de l'estació, on es podran comprar aliments i productes similars als d'una benzinera convencional però respectuosos amb el medi ambient. La botiga estarà a peu dels assortidors, ocupant la planta baixa, mentre que les oficines es trobaran a la segona i tercera planta de l'edifici. En aquestes plantes s'instal·larà l'oficina de l'empresa i l'espai restant serà llogat com a una zona co-working on acollir a noves Startups nascudes a Barcelona.

S'ha escollit aquesta ubicació per diversos motius de pes. Per una banda està situada al costat de la Ronda del Litoral, fet que facilita el accés per als clients de Barcelona i rodalies. En segon lloc es troba molt propera al port i facilita el transport d'hidrogen a possibles embarcacions que ho demandin. Per últim, és una via força transitada que ajudarà a donar a conèixer la nostre estació de servei, per tant, ens ajudarà a captar clients i donar-nos a conèixer. En la mateixa línia del *màrketing*, està situada al costat del mar, aquest fet va molt acompanyat de la proposta de valor que es vol donar com a empresa, una companyia que va de la ma de la natura i que té com a color corporatiu el blau.

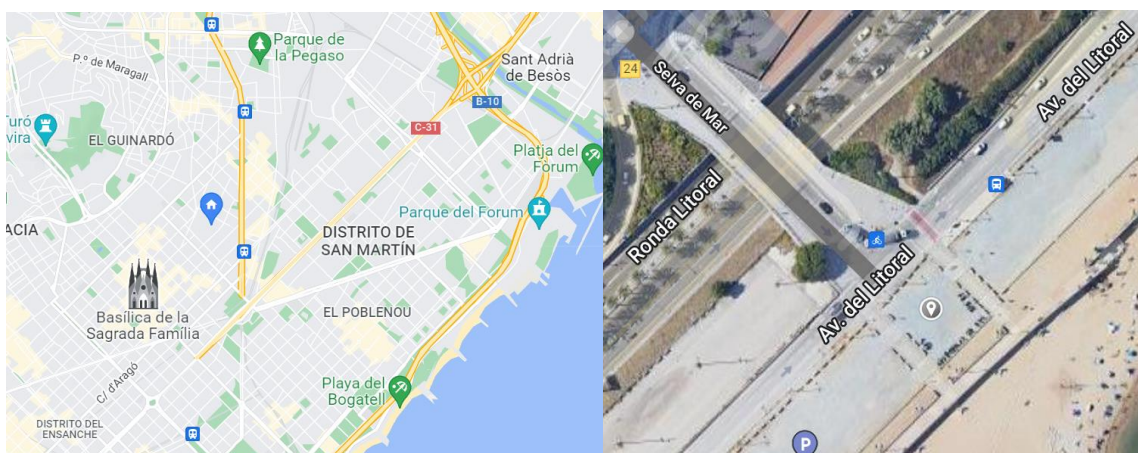


Figura 29 - Ubicació de la hidrogenera

- **Maquinària**

En el cas de Blue to Energy la maquinària és un aspecte important ja que és el que ens permetrà emmagatzemar i subministrar l'hidrogen de manera segura.

L'emmagatzematge de combustible es durà a terme en tancs capaços d'emmagatzemar l'hidrogen a una pressió de fins a 1000 bars. Està previst començar el projecte amb dos tancs de 1000 kg de capacitat, tot i que no es descarta arribar a implementar-ne més en funció de la demanda. Amb un d'aquests tancs podries alimentar més de 160 cotxes, més que suficient

per a una ciutat com Barcelona amb un parc tant reduït de cotxes amb pila d'hidrogen. S'ha escollit una capacitat tant gran d'emmagatzematge per dos motius principals, per una banda per estalviar en costos de transport de l'hidrogen fins la nostra estació i per altre banda per poder destinar un dels dipòsits exclusivament al proveïment i que encara segueixi quedant un com a reserva pels altres possibles consumidors previstos.

Hiperbaric és un dels líders mundials dedicats a l'emmagatzematge d'hidrogen per l'automoció i serà el nostre proveïdor de l'encàrrec. L'estimació de pressupost de cada tanc d'hidrogen és de 100.000 euros.

Per fer possible el proveïment als vehicles o camions cisterna que vulguin carregar els seus dipòsits, és essencial tenir assortidors especials. Un assortidor es compon principalment per dues parts principals: la unitat de control electrònica, que controla el funcionament de la bomba, i una secció mecànica que conté la bomba elèctrica i unes vàlvules que bombegen el combustible. Degut a la complexitat del sistema i a les unitats electròniques, haurem de comptar també amb un equip informàtic, detallat en el proper apartat.

La nostra estació de servei estarà dotada de dos assortidors d'hidrogen, també encarregats a Hiperbaric i cadascun d'aquests tindrà un valor estimat de 70.000 euros.

- **Equip informàtic**

Tal i com s'ha esmentat en el punt anterior, serà necessari un equip informàtic que controli en tot moment els valors de pressió dels tancs de combustible i reguli les unitats de control dels assortidors.

Dins d'aquest equip també s'engloba els ordinadors i dispositius de l'àrea co-working i el caixer que hi haurà a l'estació de servei, des d'on es podrà monitoritzar l'estat dels tancs i assortidors així com controlar la caixa i l'*stock* de la botiga.

L'equip informàtic serà comprat a l'empresa HP i tindrà un cost aproximat de 20.000 euros. D'altre banda, el sistema informàtic serà proveït per Hiperbaric i entra dins del cost dels assortidors, amb un cost mensual per manteniment i incidències de 300 euros.

- **Proveïment**

Degut a que l'hidrogen verd no serà produït a les nostres instal·lacions, s'haurà de comptar amb un proveïdor que s'encarregui d'obtenir l'hidrogen i transportar-lo fins la nostre estació. El soci encarregat de proveir l'hidrogen és La Vall d'Hidrogen de Catalunya, que es una societat d'impulsors institucionals i empreses líders del sector com Repsol, Enagas o la Generalitat de Catalunya. Aquesta societat té diversos projectes en curs, però es comptarà amb el propulsat per l'empresa Somfets, que consisteix en plantes de producció d'hidrogen verd a partir d'energia solar i eòlica distribuïdes per la província de Tarragona. Aquest projecte té com a finalitat la producció i distribució de l'hidrogen renovable a un baix cost, fet que ens ajudarà a abaixar el preu del combustible. (50)

"Els costos per produir hidrogen verd han caigut un 50% des del 2015 i podrien reduir-se en un 30% addicional per al 2025 a causa dels beneficis d'una escala més gran i una fabricació més estandarditzada, entre altres factors", va afirmar Simon Blakey, assessor principal de gas global a IHS Markit.

El cost de l'hidrogen verd és determinat, principalment, per 3 factors:

- El cost de l'electricitat utilitzada a l'electròlisi.
- El cost de la planta d'electròlisi. Com més gran sigui la potència instal·lada, la ràtio €/MW serà menor.
- Hores d'operació en què la planta funciona. En aquest aspecte, com més hores d'operació, més quantitat d'hidrogen es produirà amb la mateixa inversió, per la qual cosa el preu de venda és menor.

Tenint en compte tots aquests factors, el preu de l'hidrogen pot oscil·lar des de 3-4 €/kg fins als 10 €/kg, encara que prenent com a referència el preu de venda a hidrogeneres d'altres països, l'hidrogen costa actualment entre 8 i 10 euros per quilogram. (51) Considerant que l'hidrogen prové de la VHC, s'espera obtenir un preu competitiu que no superi els 5 €/kg i que inclús abaixi més en funció de l'estació de l'any i del temps que tingui la planta, arribant a un cost en 2035 que envolti l'euro per litre de combustible.

1.8.4.2. Estratègia de recursos humans

L'estratègia de recursos humans és un dels punts amb menys pes dins l'anàlisi intern. Al tractar-se d'un negoci petit, no es necessita una estratègia concreta de recursos humans, de fet, es contractarà una empresa externa que ens proporcioni als treballadors.

A part de l'equip directiu, que estarà format pel CEO de l'empresa i socis inversors, es necessitarà una empresa que s'encarregui de la neteja i el personal de la botiga.

Així doncs, es necessitaran dos treballadors a jornada completa per cobrir les hores que està oberta l'estació de servei i l'equip de neteja que treballarà dues hores al dia, per mantenir l'espai *co-working* i la tenda. Per altre banda, també es contractarà a una empresa que s'encarregui del manteniment de la instal·lació.

El cost estimat mensual destinat a recursos humans és de 75.000 euros.

1.8.5. Pla financer

1.8.5.1. Desglossament econòmic

A continuació s'exposaran les entrades i sortides de diners de l'empresa, és a dir, el potencial econòmic del projecte. Aquest apartat recull i desglossa les dades ja esmentades en els anteriors i algunes estimacions plantejades per resoldre el pla financer.

1.8.5.1.1 Planificació de costos

Tenint en compte totes les estimacions detallades en l'estratègia de recursos materials i humans, s'ha creat la següent taula resum que engloba la inversió inicial i els costos variables i fixes de la companyia:

Costos pla financer B2E		
Concepte	Import	
	Any 0	Any 1-10
Inversió inicial		
Edificació	600.000 €	
Maquinària	340.000 €	
Llicències	30.000 €	2.500 €
Equips informàtics	20.000 €	
Tessoreria	500.000 €	
Total	1.490.000 €	2.500 €
Costos fixes		
Recursos humans	50.000 €	50.000 €
Botiga	75.000 €	75.000 €
Seguros	5.000 €	5.000 €
Manteniment	1.000 €	500 €
Software	300 €	300 €
Lloguer	2.500 €	2.500 €
Marketing	10.000 €	20.000 €
Altres	50.000 €	30.000 €
Total	193.800 €	183.300 €
Costos variables		
Aprovisionament de carburant	10.000 €	10.000 €
Aprovisionament de botiga	50.000 €	50.000 €
Total	60.000 €	60.000 €

Taula 18 - Costos del pla financer B2E

1.8.5.1.2 Planificació d'ingressos

Els ingressos de B2E es poden resumir en dos blocs principals: la venda als usuaris i la venda a empreses, que engloba des de la comercialització a la indústria fins al proveïment d'hidrogen per el transport marítim, flotes de camions o autobusos.

Per calcular correctament les ventes que es duran a terme, s'han de fer una sèrie de suposicions de les variables directes. En primer lloc, el marge de benefici dependrà del preu del combustible, ja que tot i que imposen un percentatge de benefici entre el preu al que obtenim el combustible i el preu final, quan el preu del combustible pugi notablement, es reduirà el marge de benefici per tenir un preu competitiu i viceversa. Tenint en compte que el nostre hidrogen prové d'energies renovables, es considera que el preu augmentarà en els mesos que hi hagi menys energia solar i eòlica i s'abaixarà quan aquesta sigui suficient. En aquest estudi no es calcularà el marge de benefici en funció de l'energia produïda en la planta, sinó que es considerarà que, al cap d'un any, el benefici total net per un kg d'hidrogen és del 10% en el cas d'un usuari particular i el 8% en cas que la venda es faci a una empresa.

L'altre variable que sí s'ha estimat és el preu al que s'obté el combustible al llarg dels anys. Segons l'informe publicat per Rethink Energy (52), es preveu que gràcies a les grans inversions en l'obtenció d'aquest combustible avivaran l'economia d'escala de diferents elements necessaris en la producció com els electrolitzadors, que es sumarà a la pujada del cost d'abocar CO₂ a l'atmosfera i una caiguda en picat del cost de les energies renovables. Aquests factors, sumats a l'amortització de la planta renovable i la implicació de la Generalitat de Catalunya en el nostre projecte, fan que sigui una realitat que el cost de l'Hidrogen baixi molt abans del que s'esperava. Segons l'estudi, als Estats Units s'estima que el cost de l'hidrogen verd caigui des de els actuals 3,2-5,75 €/kg fins a poc més d'1 dòlar el kg en 2035, dinàmica que seguirà fins arribar als 0,75 €/kg en 2050.

Així doncs, agafant aquest descens com a referència, s'ha fet la següent estimació de la caiguda del preu de l'hidrogen al llarg dels anys:

	Costos d'obtenció de l'hidrogen								
Any	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Cost (€/kg)	5,15	4,38	3,72	3,16	2,69	2,29	1,94	1,65	1,40
Reducció		15,0%	15,0%	15,0%	15,0%	15,0%	15,0%	15,0%	15,0%
Benefici 10%	0,52	0,44	0,37	0,32	0,27	0,23	0,19	0,17	0,14
Benefici 8%	0,41	0,35	0,30	0,25	0,22	0,18	0,16	0,13	0,11
Any	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075
Cost (€/kg)	1,00	0,92	0,84	0,77	0,73	0,70	0,66	0,63	0,60
Reducció	28,6%	8,3%	8,3%	8,3%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%
Benefici 10%	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06
Benefici 8%	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05

Taula 19 - Previsió del cost de l'hidrogen

Un cop establert el preu al que comprarem l'hidrogen, cal definir una projecció del combustible que es vendrà en la mateixa franja de temps. En aquest cas també es farà una estimació de l'augment del parc de cotxes que es subministraran en la nostra estació i les ventes a empreses. En la següent taula resum es mostra un retall dels increments que s'han utilitzat:

Any	2022	2023	2029	2030
Venta a usuaris (kg)	70.000	84.000	250.823	300.987
Augment		20,0%	20,0%	20,0%
Venta a empreses (kg)	200.000	242.000	759.500	918.995
Augment		21,0%	21,0%	21,0%
Total ventes	1.100.000 €	1.143.355 €	1.504.735 €	1.590.636 €
Total benefici	118.450 €	121.519 €	141.723 €	145.410 €
Any	2035	2040	2070	2075
Venta a usuaris (kg)	376.234	470.292	1.794.023	2.242.529
Augment	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
Venta a empreses (kg)	1.167.123	1.482.246	6.219.317	7.898.533
Augment	27,0%	27,0%	27,0%	27,0%
Total ventes	1.546.121 €	1.832.236 €	5.705.120 €	6.961.268 €
Total benefici	131.303 €	152.168 €	425.707 €	511.472 €

Taula 20 - Previsió de ventes i beneficis

Un cop calculat el benefici que obtindrem de la venda d'hidrogen ja només caldrà tenir en compte la resta de fonts d'ingressos: inversions externes, venda a la botiga i lloger de l'espai *co-working*, que s'inclouen directament en el pla financer (1.8.5).

1.8.5.2. Indicadors de rendibilitat

Els següents indicadors de rendibilitat indicaran si el projecte és rentable o no segons les variables establertes, aquests indicadors ajudaran a prendre la decisió de si és viable muntar, o no, el negoci.

En els següents punts s'explicarà el Valor Actual Net (VAN) i la Taxa Interna de Retornament (TIR), que ens ajudaran a entendre el retorn de la inversió i la rendibilitat d'aquesta.

1.8.5.2.1 Valor Actual Net

El VAN és un indicador que ens permet comptar amb el valor present d'un determinat número de fluxos de caixa futurs, originats per una inversió. La metodologia d'aquest indicador consisteix en descomptar el moment actual, és a dir, actualitzar mitjançant una taxa que mostri el cost d'oportunitat dels fons econòmics de l'empresa. A aquest valor se li resta la inversió inicial, de manera que el valor obtingut serà el valor actual net del projecte. La taxa d'interès amb la que es descompte el flux net projectat, és la taxa d'oportunitat, rendiment o rendibilitat mínima esperada, per tant, quan la inversió resulta més gran que el BNA (benefici net actualitzat), és a dir VAN negatiu, és perquè no s'ha satisfet aquesta taxa. Per contra, quan el BNA és igual a la inversió (VAN igual a zero) és perquè s'ha complert la taxa i quan el BNA és major que la inversió (VAN positiu), és perquè s'ha complert la taxa i, a més, s'ha generat un benefici addicional.

Aquest indicador ens pot ajudar a comparar la viabilitat de diferents projectes, però també ens permetrà comparar-ho amb el nostre propi negoci i determinar si el preu al que estem oferint el combustible està per sobre o per sota del valor mínim perquè el projecte sigui rentable.

La fórmula que ens permet calcular el VAN és:

$$VAN = \sum \frac{F_t}{(1+k)^t} - I_0 \quad (\text{Equació 25})$$

On:

F_t – Flux de caixa del període

k – Taxa interna de retorn

t – Temps (anys)

En aquest cas s'ha calculat el flux d'ingressos sumant els costos fixos anuals comentats en la **Taula 18** i calculant els costos variables de proveïment de combustible en funció dels kg demandats. Per altre banda, en el flux d'ingressos s'ha considerat una inversió externa inicial de 500.000 euros, el benefici net de la venda de combustible mostrat en la **Taula 20** i uns beneficis anuals de la venda de productes a la botiga i el lloguer de l'espai *co-working* de 120.000 euros.

Any	Temps (anys)	Flux d'ingressos	Flux de despeses
	0	500.000 €	1.490.000 €
2022	1	288.450 €	256.300 €
2023	2	291.519 €	256.300,0 €
2024	3	294.670 €	258.374,2 €
2025	4	297.904 €	260.878,9 €
2070	49	595.707 €	492.108,0 €
2071	50	681.472 €	557.375,5 €
2072	51	681.472 €	557.375,5 €
2073	52	681.472 €	557.375,5 €
2074	53	681.472 €	557.375,5 €
2075	54	681.472 €	557.375,5 €

Taula 21 - Planificació d'ingressos i despeses

Amb totes aquestes consideracions, s'ha obtingut un **VAN negatiu de -634.200€**.

1.8.5.2.2 Taxa Interna de Retorn

La taxa interna de retorn (TIR) d'una inversió està definida com la taxa d'interès amb el que el valor net o valor present net és igual a zero. Aquest indicador s'utilitza per decidir sobre l'acceptació o no d'un projecte d'inversió.

Per tant, la fórmula del TIR és la mateixa que la del VAN però igualant-la a 0:

$$VAN = \sum \frac{F_t}{(1+k)^t} - I_0 = 0 \quad (\text{Equació 26})$$

Tenint en compte el mateix flux de beneficis mostrat a la **Taula 21**, s'ha obtingut un **TIR del 4%**.

1.8.5.3. Conclusions i escenificació viable

Amb les estimacions que s'han fet per definir els ingressos i les despeses que tindrà la companyia B2E i partint dels resultats obtinguts en els indicadors de rendibilitat del projecte, es treuen les següents conclusions:

- $VAN = -634.200 \text{ €} < 0$
En resultat del VAN és negatiu, això significa que la inversió està per sota de la rendibilitat exigida i produiria pèrdues, per tant, el projecte s'hauria de rebutjar.
- $TIR = 4\% < k \text{ (10\%)}$
Al obtenir un TIR menor a la taxa de descompte k , el projecte no ens proporcionarà la rendibilitat necessària perquè sigui viable.

Escenari 2

Assumint que els nostres ingressos depenen principalment de la taxa d'interès que obtenim de la venda d'hidrogen, en aquest segon escenari s'han calculat de nou els fluxos d'ingressos considerant que es cobra un **15%** de benefici sobre el preu al que obtenim el combustible a l'usuari particular i un **12%** a empreses.

Tenint en compte aquestes modificacions, s'han obtingut els següents resultats:

- $VAN2 = 102.728 \text{ €} > 0$
- $TIR2 = 11\% > k \text{ (10\%)}$

En aquest escenari sí hem obtingut un VAN2 positiu i un TIR2 lleugerament per sobre del 10% que s'havia considerat com a taxa interna de retorn. Per tant, en aquest cas **la inversió sí seria rentable**.

Per conèixer quant de temps trigarem a començar a obtenir beneficis de la inversió inicial d'aquest escenari, s'ha calculat el **Període de Recuperació de la Inversió (PRI)**:

$$PRI = A + \frac{B}{C} \quad (\text{Equació 27})$$

On:

A – Període del últim flux negatiu

B – Valor absolut del últim flux negatiu.

C – Valor del següent flux

Finalment s'ha obtingut un resultat de recuperació de la inversió de **10,066 anys**. Per tant, podem concloure que aquest segon escenari **sí seria una inversió viable** i recuperariem la inversió inicial abans d'arribar a l'**any 11**.

Bibliografia

1. **Laboratori Nacional dels Àlbers per al NNSA del Departament d'Energia dels EUA. 2016.**
2. **Ewan i Allen . 2005.**
3. **Todos los colores del hidrógeno. *Energías renovables - El periodismo de las energías limpias.* 2020.**
4. **Miloš Auersvald, Bogdan Shumeiko, Dan Vrtiška, Petr Straka, Martin Staš, Pavel Šimáček, Josef Blažek, David Kubička. Hydrotreatment of straw bio-oil from ablative fast pyrolysis to produce suitable refinery intermediates. 2019.**
5. **García-Conde, Antonio González. *Producción, almacenamiento y distribución del hidrógeno.***
6. **Stirweld. [En línia] <https://stirweld.com/es/tanque-criogenico-de-hidrogeno-un-concepto-de-futuro-para-la-aeronautica/>.**
7. **Apilados. [En línia] <https://apilados.com/blog/3-metodos-almacenamiento-hidrogeno/>.**
8. **Redondo, Mónica. La Union Europea exigirá una hidrogenera cada 150 kilómetros. 2021.**
9. **Centro Nacional del Hidrógeno. [En línia] cnh2.es/pilas-de-combustible/.**
10. **Ramos, Enrique Calleja. *Diseño de una pila de hidrógeno para su aplicación en la automoción.* 2018.**
11. **García-Barrientos, Abel. *Fuentes de Energías Alternas: Teoría y Práctica.* 2014.**
12. ***Pilas de combustible en el Espacio: Misiones Gemini.* Santiago, Oscar. s.l. : Apilados, 2016.**
13. **Camós, Josep. Motorpasion. [En línia] 10 / 10 / 2016. <https://www.motorpasion.com/tecnologia/celebremos-50-anos-de-coches-con-pila-de-combustible-sin-apenas-coches-con-pila-de-combustible>.**
14. **Donaire, Diego López. Actualidadmotor. [En línia] 2021. <https://www.actualidadmotor.com/funcionamiento-basico-del-motor-de-hidrogeno/>.**
15. **Group, BMW. *El tren motriz del BMW i Hydrogen NEXT.* 2020.**
16. **Wikiwand. [En línia] https://www.wikiwand.com/en/Toyota_FCHV.**

17. Fuentes, Victoria. Motorpasion. [En línia] 25 / 02 / 2021. <https://www.motorpasion.com/pruebas-de-coches/toyota-mirai-2021-prueba-contacto>.
18. Toyota. Toyota.es. [En línia] <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/segunda-generacion-Toyota-Mirai>.
19. Callejo, Alber. Forococheselectricos. [En línia] 21 / 01 / 2022. <https://forococheselectricos.com/2022/01/honda-critica-toyota-motores-combustion-hidrogeno.html>.
20. *¿Qué son las pilas de combustible?* Rodríguez, Manuel. s.l. : Revista Digital INESEM, 2017.
21. Santiago, Oscar. Tipos de pilas de combustible y su clasificación. *Apilados*. 2016.
22. —. ¿Por qué es necesario apilar pilas de combustible? *Apilados*. 2016.
23. *La tecnología que acabará con el coche eléctrico cada vez más cerca*. Díaz, Jesús. s.l. : El Confidencial, 2022.
24. Europa Press. 2022.
25. *Pilas de combustible de ácido fosfórico*. s.l. : Appice.
26. Ingemechanica. [En línia] <https://ingemechanica.com/tutorialsemanal/tutorialn115.html>.
27. Puente, Miguel García. Lo que esconde la segunda generación del Toyota Mirai. 2021.
28. Marín, Alejandro. UPC Commons. [En línia]
29. Pascual, José D. Motor.es. <https://www.motor.es/que-es/motor-wankel>. [En línia]
30. *El motor Wankel y su futuro unido al hidrógeno*. s.l. : Sobre Ruedas, 2021.
31. DAPARTO. [En línia] <https://www.daparto.es/info/como-funciona-motor-combustion-coche/>.
32. *Sustituir gasoil por hidrógeno, la tecnología que dará una nueva vida a los motores diésel*. TRADE, WORLD ENERGY. s.l. : WORLD ENERGY TRADE, 2022.
33. Pablo García. Yamaha construye un V8 a hidrógeno, ¿razones para ilusionarse? *Soy Motor*.
34. Murias, Daniel. Motorpasion. [En línia] 03 / 12 / 2021. <https://www.motorpasion.com/toyota/toyota-gr-yaris-h2-hidrogeno-ultima-fina-esperanza-motor-combustion-interna>.

35. —. Motorpasion. [En línia] 14 / 07 / 2021.
36. Moscoso, Brasil. Octanosmedia. [En línia] 06 / 2021.
37. Fernández, Antonio. Motor.es. [En línia] 24 / 09 / 2021.
38. *El Lexus ROV Concept es un divertido buggy con un motor de combustión de hidrógeno.* Romero, Fran. 2021.
39. Doll, Scooter. Electrek. [En línia] 01 / 2020. <https://electrek.co/2022/01/20/honda-ceo-says-toyotas-strategy-to-pursue-hydrogen-cars-doesnt-seem-feasible/>.
40. *Ford Patents Hydrogen-Fueled Combustion Engine.* Sergeev, Angel. 2022.
41. *FORD PATENTS TURBOCHARGED HYDROGEN COMBUSTION ENGINE.* Accardi, Michael. s.l. : Muscle Cars and Trucks, 2022.
42. *Geographic, Redacció National.* 2018.
43. *Hideo Mochizuki, Ryuji Kawamoto, Mazda Motor. Estimation of CO2 Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA.* 2019.
44. *España, Red Eléctrica de. "METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL INVENTARIO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) DE RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA.* 2017.
45. *Ministerio de la Transición Energética y Reto Demográfico.* [En línia] <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/default.aspx>.
46. *Buchal, Christoph. s.l. : CES-Ifo.*
47. *Larsson, Mats-Ola. Informe sobre la huella de carbono de la producción de baterías eléctricas para coches. s.l. : IVL.*
48. *Ecológica, Ministerio de Transición. Factores de Emisión.* 2021.
49. *Reduction, European Week For Waste.* 2020.
50. *Villarreal, David. Vía libre al coche de hidrogeno con un surtidor cada 150 km. Diariomotor.* 2021.
51. *Ministerio de Industria, comercio y turismo. INFORME SOBRE LA REGLAMENTACIÓN ACTUAL Y NECESIDADES DE DESARROLLO LEGISLATIVO.* 2019.
52. *Entra en funcionamiento la primera hidrogenera de Iberdrola en Barcelona. Ara. Economía,* 2021.

53. *Vall de l'Hidrogen a Catalunya*. [En línia] <https://www.h2valley.cat/es/proyectos/#mobilitat>.
54. *Hidrógeno Verde*. [En línia] 2021. <https://hidrogeno-verde.es/precio-del-hidrogeno/>.
55. *Morgan, Harry. Rethink Research*. [En línia] 2022.
56. *Encyclopedia of the Elements Per Enghag*. 2008.
57. *Pascual, José D. Motor.es*. <https://www.motor.es/que-es/motor-wankel>. [En línia]
58. *ComoFunciona*. [En línia] <https://como-funciona.co/los-motores-diesel/>.
59. *ComoFunciona*. [En línia] <https://como-funciona.co/los-motores-de-gasolina/>.
60. *Clavero, David. Sustituir gasoil por hidrógeno, la tecnología que dará una segunda vida a los motores diésel*. *DiarioMotor*. 2022.
61. —. *Sustituir gasoil por hidrógeno, la tecnología que dará una segunda vida a los motores diésel*. *DiarioMotor*. 2022.
62. *Herráez, Mario. Lexus ROV, un pequeño todoterreno movido por hidrógeno*. *Motor El País*. 2021.
63. *Otero, Alejandra. Motorpasion*. [En línia] 10 / 09 / 2019. <https://www.motorpasion.com/bmw/bmw-i-hydrogen-next>.