

Treball de Fi de Màster

## Màster Universitari en Enginyeria Industrial

# Desenvolupament del model energètic d'un vehicle híbrid

MEMÒRIA

**Autor:** Pol Guiu Llopart  
**Director:** Daniel Montesinos Miracle  
**Convocatòria:** Juny 2021



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resum

El present document té com a objectiu el desenvolupament del model energètic d'un vehicle híbrid, alimentat amb una pila de combustible d'hidrogen i un sistema d'emmagatzematge que consisteix en una bateria.

El contingut del projecte s'organitza en dos blocs. En primer lloc es fa una introducció teòrica, on s'exposen els motius pels que és important conèixer, estudiar i desenvolupar alternatives als vehicles de combustió, es defineixen diferents tecnologies utilitzades en aquest sector i s'expliquen els components d'un vehicle d'aquestes característiques. En el segon bloc es presenta la modelització i estudi del sistema energètic que simula el comportament d'un vehicle híbrid.

A la part pràctica del projecte, exposada al segon bloc, es fa ús de la metodologia EMR per a la implementació del model mitjançant el programari Matlab. Amb aquesta metodologia es modelitzen els components del vehicle per separat, de manera que es simplifica la comprensió per, tot seguit, unificar-les per tal que actuïn com parts d'un mateix sistema.

Per acabar amb el segon bloc del treball, es realitzen simulacions a partir de les quals es comprova el correcte funcionament del model. Es poden observar els requeriments de potència necessaris per satisfer la demanda, imposada per unes condicions de treball determinades i la capacitat de generació de les fonts d'energia.

Es conclou que la modelització feta és eficaç per conèixer a grans trets el comportament i necessitats energètiques d'un sistema com el que s'estudia. A més, al fer ús de la metodologia EMR es podria aprofundir fàcilment en el model de cada una de les components per aconseguir resultats més exactes.

## Resumen

El presente documento tiene como objetivo el desarrollo del modelo energético de un vehículo híbrido, alimentado con una pila de combustible de hidrógeno y un sistema de almacenamiento que consiste en una batería.

El contenido del proyecto se organiza en dos bloques. En primer lugar se hace una introducción teórica, donde se exponen los motivos por los que es importante conocer, estudiar y desarrollar alternativas a los vehículos de combustión, se definen diferentes tecnologías utilizadas en este sector y se explican los componentes de un vehículo de estas características. En el segundo bloque se presenta la modelización y estudio del sistema energético que simula el comportamiento de un vehículo híbrido.

En la parte práctica del proyecto, expuesta al segundo bloque, se hace uso de la metodología EMR para la implementación del modelo mediante el software Matlab. Con esta metodología se modelizan los componentes del vehículo por separado, por lo que se simplifica la comprensión para, acto seguido, unificarlas de forma que actúen como partes de un mismo sistema.

Para acabar con el segundo bloque del trabajo, se realizan simulaciones a partir de las cuales se comprueba el correcto funcionamiento del modelo. Se pueden observar los requerimientos de potencia necesarios para satisfacer la demanda, impuesta por unas condiciones de trabajo determinadas y la capacidad de generación de las fuentes de energía.

Se concluye que la modelización hecha es eficaz para conocer a grandes rasgos el comportamiento y necesidades energéticas de un sistema como el que se estudia. Además, al hacer uso de la metodología EMR se podría profundizar fácilmente en el modelo de cada una de las componentes para conseguir resultados más exactos.

## Abstract

This paper aims to develop the energy model of a hybrid vehicle, powered by a hydrogen fuel cell and a storage system consisting of a battery.

The content of the project is organized in two blocks. On the first one, a theoretical introduction is made, where the reasons why it is important to know, study and develop alternatives to combustion vehicles are explained, different technologies used in this sector are defined and finally, the components of a vehicle are explained. The second block presents the model and the study of the energy system that simulates the behaviour of a hybrid vehicle.

In the practical part of the project, exposed in the second block, the EMR methodology is used on the implementation of the model using the Matlab software. This methodology models the components of the vehicle separately, so that comprehension is simplified and then unified them so that they act as parts of the same system.

At the end of the second block, simulations are performed from which the correct operation of the model is checked. You can see the power requirements needed to meet the demand, imposed by certain working conditions and the generation capability from the energy sources.

It can be concluded that the model done is effective to observe the behaviour and the energy needs of a system as the studied. In addition, by using the EMR methodology one could easily improve the model of each of the components to achieve more accurate results.



# Índex

<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>9</b>
1.1. Objectius del projecte.....	9
1.2. Abast del projecte .....	10
1.3. Transició dels combustibles fòssils .....	10
1.3.1. Les possibilitats de l'hidrogen.....	12
1.4. Alternatives al vehicle de combustió .....	16
1.4.1. Vehicle elèctric pur (BEV) .....	17
1.4.2. Vehicles híbrids.....	18
1.5. Components del vehicle híbrid d'hidrogen.....	22
1.5.1. Pila de combustible .....	22
1.5.2. Bateria.....	27
1.5.3. Motor elèctric.....	29
1.5.4. Altres components .....	31
<b>2. CAS PRÀCTIC: MODELITZACIÓ D'UN VEHICLE</b>	<b>34</b>
2.1. Eines per a la modelització .....	34
2.1.1. Matlab Simulink.....	34
2.1.2. EMR.....	34
2.2. Modelat del vehicle híbrid d'hidrogen .....	37
2.2.1. Càrrega .....	37
2.2.2. Elements de la cadena principal .....	41
2.2.3. Alimentació .....	44
2.2.4. Control .....	56
2.2.5. <i>Strategy</i> .....	60
2.3. Simulacions.....	60
2.3.1. Resultats de la càrrega .....	60
2.3.2. Resultats del vehicle elèctric .....	63
2.3.3. Resultats del vehicle híbrid .....	64
2.3.4. Prestacions del vehicle.....	70
<b>3. PRESSUPOST</b>	<b>71</b>
3.1. Costos directes .....	71
3.2. Costos indirectes .....	72
3.3. Costos totals .....	72
<b>4. ESTUDI MEDIAMBIENTAL</b>	<b>73</b>
4.1. Cicle de vida.....	73
4.2. Impacte d'implantació dels FCEV .....	74

<b>CONCLUSIONS</b>	<b>76</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>79</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>80</b>
<b>ANNEXOS</b>	<b>83</b>
Annex A: Paràmetres del vehicle .....	83
Annex B: Vehicle elèctric.....	83
Annex C: Vehicle híbrid.....	83
Annex D: Forces del vehicle.....	83
Annex E: Pila de combustible.....	83
Annex F: Bateria.....	83





# 1. Introducció

Cada vegada és més important tenir disponible un mètode de transport ràpid i còmode que permeti a l'usuari ser independent i complir amb les seves obligacions. És per això que, en els últims anys i d'ençà que la humanitat va descobrir l'automoció com a mètode de transport ràpid i eficaç, la necessitat d'aquesta ha anat en augment. Tant és així, que el consum, i en conseqüència, la contaminació generada en aquest sector, s'han multiplicat en les últimes dècades.

Actualment, el model de transport present a la majoria de països es basa en vehicles de combustió amb els inconvenients que això comporta, entre altres, la producció de gasos d'efecte hivernacle, generació de contaminació acústica, el baix rendiment i existència de focus mòbils contaminants que, sobretot a les grans ciutats, empitjoren el nivell de vida i la qualitat de l'aire.

Com a conseqüència d'aquests factors, des de fa uns anys, el sector automobilístic s'està dirigint cap a l'electrificació dels vehicles i s'estan començant a provar diferents alternatives, tot esperant trobar alguna capacitat de substituir els vehicles que funcionen amb combustibles fòssils. En aquest sentit i gràcies a la creixent demanda d'aquests vehicles, s'estan generant avenços tecnològics en els components que els formen que permetran, en un futur pròxim, reduir el seu cost d'adquisició, un dels motius principals pels quals no tenen millor acollida al mercat.

Tots els fets esmentats condueixen a la implementació d'un nou model de transport basat en l'ús de vehicles alimentats amb fonts no contaminants i renovables, com poden ser els vehicles híbrids alimentats amb pila de combustible i bateries.

## 1.1. Objectius del projecte

L'objectiu del present projecte és el de dissenyar un model de vehicle híbrid utilitzant com a fonts d'alimentació bateries i una pila de combustible d'hidrogen.

Per generar el model, primerament, es documenten i descriuen les parts d'un vehicle d'aquest tipus, tot comparant-les amb tecnologies alternatives per tal de conèixer les opcions existents i les que estan en vies de desenvolupament.

El segon pas del treball consistirà en implementar un model matemàtic mitjançant un software informàtic per, finalment, poder estudiar els resultats extrets de les simulacions del model i poder entendre millor el funcionament energètic d'un vehicle amb aquestes característiques.

Forma part també dels objectius posar en pràctica dels coneixements adquirits al màster cursat, el Màster Universitari en Enginyeria Industrial.

## 1.2. Abast del projecte

L'abast del projecte queda definit dins els límits d'un Treball Fi de Màster, quedant limitada la dedicació a aquest, tant en temps com en recursos econòmics, per altres tasques a desenvolupar que formen part dels estudis cursats.

No s'ha pogut implementar físicament el model dissenyat mitjançant components reals d'un vehicle de les característiques estudiades. No es contemplen tampoc amb profunditat les característiques energètiques de cada part del vehicle per la seva gran complexitat i pel temps requerit per a la modelització d'aquestes. En comptes d'això es fan simplificacions que permeten estudiar el comportament general del vehicle.

Queda dins l'abast d'aquest document la definició d'un model matemàtic que simuli el comportament energètic d'un vehicle híbrid amb pila de combustible i bateries, el càlcul i estudi de la potència necessària per fer funcionar aquest vehicle sota unes condicions de conducció determinades i l'estudi dels components que el formen, així com l'anàlisi del resultat per a una millor comprensió del seu funcionament.

## 1.3. Transició dels combustibles fòssils

Per entendre la necessitat de canvi en el sector de l'automoció respecte el model existent, cal conèixer les conseqüències lligades al ritme de consum i contaminació actuals.

En els últims anys, la mobilitat ha anat en augment tant en el transport de mercaderies com en el transport de passatgers, produint-se, a Catalunya, 22,2 milions de desplaçaments diaris de mitja al 2019. I, tot i que a les grans ciutats es pot apreciar una reducció dels viatges amb vehicle privat respecte a un augment dels realitzats a peu, en bicicleta i transport públic, es fan, cada dia, més viatges entre poblacions [1].

Analitzant el cas del territori Català, que es pot extrapolar a molts països del primer món, es pot veure com, del total de l'energia final consumida al 2017, el 42,9% es va destinar al transport i gran part d'aquesta provenia de combustibles fòssils com el gasoil i la gasolina. Com es pot veure a la Figura 1.1, un 49% de l'energia final consumida es va generar mitjançant combustibles fòssils [2] [3].

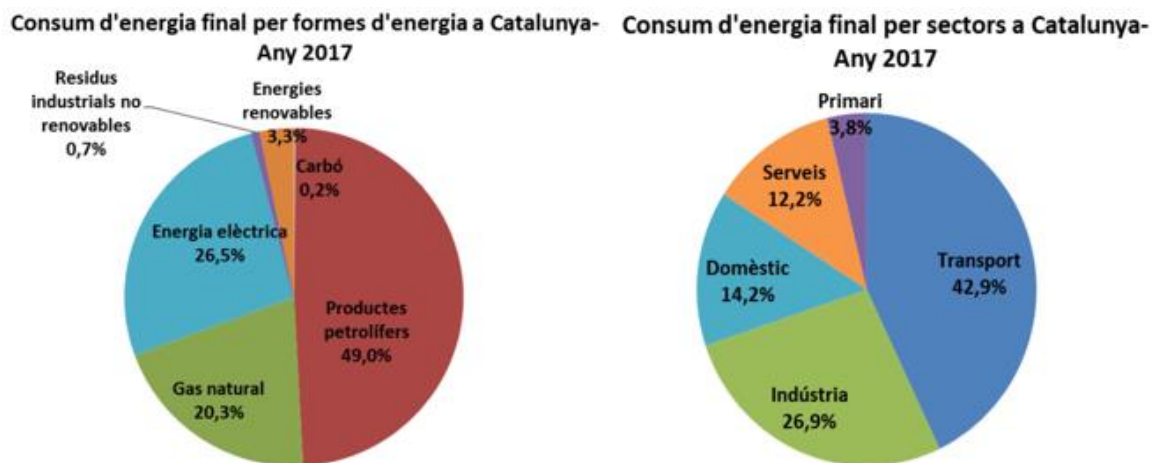


Figura 1.1. Consum d'energia final per font (esquerra) i per sectors (dreta) a Catalunya. Font: [1].

El problema del canvi climàtic i les seves conseqüències ocupa una important posició a les agendes internacionals ja que constitueix un dels perills més importants que es consideren a les matrius de riscos globals, elaborades pels organismes internacionals (*foro Davos*, G-20, Unió Europea, entre altres). En un futur pròxim, aquest risc pot arribar a afectar la productivitat mundial i l'economia de la gran majoria de països. Així doncs, tant els sectors privats com els públics, comencen a orientar les seves activitats a una economia baixa en emissions i impacte ambiental.

Amb l'objectiu de reduir l'impacte de l'activitat humana sobre el planeta, es va constituir l'Acord de París en el marc de les Nacions Unides. Aquest busca accelerar les accions i les inversions necessàries per tal d'assolir un futur sostenible i combatre el canvi climàtic. Els seus objectius principals són [5]:

- Mantenir la temperatura del planeta per sota d'un augment de 2° C en relació als nivells que existien abans de la industrialització.
- Adoptar mesures perquè els països puguin afrontar els efectes del canvi climàtic que siguin inevitables.

Per complir amb aquestes fites la implantació de fonts energètiques alternatives i més netes per la mobilitat és un factor indispensable atès que alguns dels principals avantatges que presenten són [4]:

- No són fonts emissores de gasos d'efecte hivernacle.
- Són més eficients que el vehicle convencional de combustió. Per aquest fet presenten un consum energètic menor.
- Permetrien potenciar les energies provinents de fonts renovables.

Es pot concloure doncs, que el nivell de consum i contaminació associats a la mobilitat són insostenibles tenint en compte tant el nombre de desplaçaments com la font energètica més utilitzada en aquest sector, els combustibles fòssils.

Pel que fa al model de mobilitat, a les ciutats més poblades del món ja s'estan implantant diverses polítiques alternatives que permetran reduir el nombre de desplaçaments, subvencionant el transport públic i la mobilitat neta, com poden ser la bicicleta o anar a peu.

Per altra banda i en relació a la font energètica utilitzada, avui dia s'està vivint una transició tecnològica que va enfocada a la substitució dels combustibles fòssils. Com a alternativa als motors de combustió existeixen els motors elèctrics, que tenen un rendiment que ronda el 90%, molt més elevat al dels motors de combustió, d'un 40% aproximadament [6], i que, a més, no generen gasos d'efecte hivernacle com ho fan els seus predecessors.

Malgrat tot, s'ha d'entendre que aquesta transició no es portarà a terme de manera satisfactòria si l'energia utilitzada per generar electricitat prové dels mateixos combustibles fòssils que es pretén suprimir. És per això que com a fonts viables es contemplen l'energia renovable i la generació amb piles de combustible d'hidrogen, sent, aquesta última, la opció millor considerada a llarg termini.

### **1.3.1. Les possibilitats de l'hidrogen**

Per reafirmar la possible importància que tindran els vehicles híbrids amb pila de combustible es considera important analitzar les possibilitats energètiques de l'hidrogen, així com les metodologies de generació, transport i emmagatzematge d'aquesta matèria.

A nivell mundial l'hidrogen no es considera un combustible sinó que es tracta d'un element amb una gran capacitat de formar compostos y apareix normalment com a molècula diatòmica ( $H_2$ ). Així doncs, es pot catalogar aquest element com a vector energètic ja que és capaç d'emmagatzemar energia i alliberar-la posteriorment.

#### **1.3.1.1. Generació**

Es pot obtenir fàcilment de la natura ja que és un dels elements amb més presència a la Terra. Algunes de les formes d'obtenció són [7]:

#### **Reformat**

Actualment aquesta és la manera més econòmica donat que s'han anat perfeccionant els mètodes d'obtenció al llarg dels anys. No obstant, aquesta via té un cost energètic significatiu per aconseguir les condicions de pressió i temperatura necessaris a més de generar residus contaminats. A l'hidrogen obtingut a partir d'aquest mètode se'l coneix com hidrogen blau.

A continuació s'exposen alguns dels processos més utilitzats, classificats segons la matèria prima utilitzada, el carbó, el gas natural o el petroli.

### Carbó

Aquest procés es realitza posant en contacte el carbó amb vapor d'aigua a una temperatura pròxima als 1000°C donant lloc a la reacció química següent.



### Gas natural

El gas natural està compost entre un 80 i un 90% de metà  $CH_4$  i la resta està format per una barreja de nitrogen, diòxid de carboni i sulfur d'hidrogen ( $H_2S$ ) i altres components. El procés segueix les següents etapes:

Primerament, i abans de procedir amb el reformat del gas natural, s'extreu el sulfur d'hidrogen amb la finalitat d'eliminar compostos de sofre que després malmetrien la pila de combustible, l'ús principal de l'hidrogen que s'estudia en aquest treball. Un cop refinat, es pot fer reaccionar el gas amb diferents substàncies per tal d'obtenir hidrogen:

- Reformat amb aigua: es dona una reacció endotèrmica del metà amb l'aigua a uns 800°C en presència d'un catalitzador de níquel. Aquest procés té una eficiència que pot arribar fins al 85%.



Posteriorment, i per tal d'augmentar el rendiment del procés, es fa reaccionar el monòxid de carboni amb aigua en presència de catalitzadors de coure.



- Oxidació parcial i reformat oxidatiu: es realitza mitjançant la combustió incompleta del metà.



- Reformat en sec o amb  $CO_2$ : es dona una reacció endotèrmica, de manera que es requereixen altes temperatures perquè la reacció no s'aturi.



## Petroli

Es pot obtenir hidrogen d'alguns dels processos que s'apliquen al cru per a l'obtenció del petroli.

A més, es pot generar hidrogen de manera menys contaminant que pels processos anteriors fent ús de biocombustibles en comptes de combustibles fòssils tot i que el rati de molècules d'hidrogen obtingudes per cada àtom de carboni és menor.

Existeixen tres mètodes per obtenir hidrogen a partir de la biomassa. Aquests són la gasificació, la piròlisis i el reformat de combustibles derivats o biocombustibles.

Els dos primers són molt similars. La gasificació consisteix en escalfar la biomassa a temperatures entre els 400 i 600 °C ràpidament i sense oxigen. La piròlisis segueix el mateix procediment però en aquest cas amb presència d'oxigen i vapor d'aigua.

El reformat dels biocombustibles es realitza amb el mateix procediment que el que s'utilitza pel metà, escalfant el gas i fent que entri en contacte amb vapor d'aigua i un catalitzador.

## **Electròlisis**

Aquest procés es pot considerar com la reacció inversa a la que es dona en una pila de combustible. Mitjançant una aportació determinada de potencial elèctric es separen les molècules d'aigua en oxigen i hidrogen amb una eficiència de fins el 70%.

El principal inconvenient d'aquesta metodologia és que es requereix energia elèctrica que acaba encarint el procés. No obstant, i considerant la variabilitat en la generació de les energies renovables com l'energia solar i la eòlica, es podria fer ús d'aquest procés per acumular els pics de generació procedents d'aquestes fonts per tal que, en moments de baixa demanda energètica, es generés hidrogen i, en moments de baixa generació i alta demanda, es consumís, mitjançant una pila de combustible i generant electricitat.

Aquests són alguns dels mètodes més representatius per a la generació d'hidrogen. Existeixen molts altres en continu procés de millora que no s'han exposat en aquest apartat a causa del baix rendiment o poca implicació en la quantitat d'hidrogen generat avui dia. Tot i això, cal mencionar que la majoria dels mètodes en desenvolupament es dirigeixen cap a un mateix objectiu, generació sostenible, renovable i de baix cost.

### **1.3.1.2. Emmagatzematge i transport**

Un dels grans inconvenients i un dels motius més significatius pels quals no s'està desenvolupant de forma més accelerada aquest element com a vector energètic, són les condicions, tant d'emmagatzematge com de transport, ja que requereix unes infraestructures costoses i en conseqüència, d'una gran inversió inicial i de manteniment.

## Emmagatzematge

En quant al primer punt, principalment hi ha dues alternatives. En primer lloc, pensats per a l'acumulació a gran escala, els dipòsits subterranis o tancs d'alta pressió. I en segon lloc, per a usos a més petita escala com l'automoció, els dipòsits de baixa capacitat [8].

L'emmagatzematge d'hidrogen utilitzat a l'automoció presenta grans limitacions en quant a pes i volum. A més, existeixen requisits específics pel que fa a les condicions d'operació i cinètica de subministrament, ja que aquestes característiques són molt més exigents que pels elements estacionaris com els generadors a gran escala. No obstant, a causa del gran pes del sector automobilístic en l'economia mundial, s'estan realitzant avenços cada dia més significatius. Així doncs, existeixen diverses maneres d'emmagatzemar l'hidrogen entre les quals consten [9]:

- En gas a pressió.
- En forma líquida.
- En hidrurs metàl·lics.

Així doncs, els dipòsits més utilitzats actualment a l'automoció són de baixa capacitat, en els quals s'emmagatzema l'hidrogen a pressions d'entre 200 i 700 bars. Aquests consten normalment de tres capes, la interna, una capa *nylon* amb baixa permeabilitat a l'hidrogen, una segona capa de resina *epoxy* amb fibra de carboni que dona rigidesa estructural al conjunt, i la més externa, fabricada a partir de fibra de vidre per protegir el dipòsit contra possibles abrasions. A la Figura 1.2. es pot veure un dipòsit d'aquest tipus.

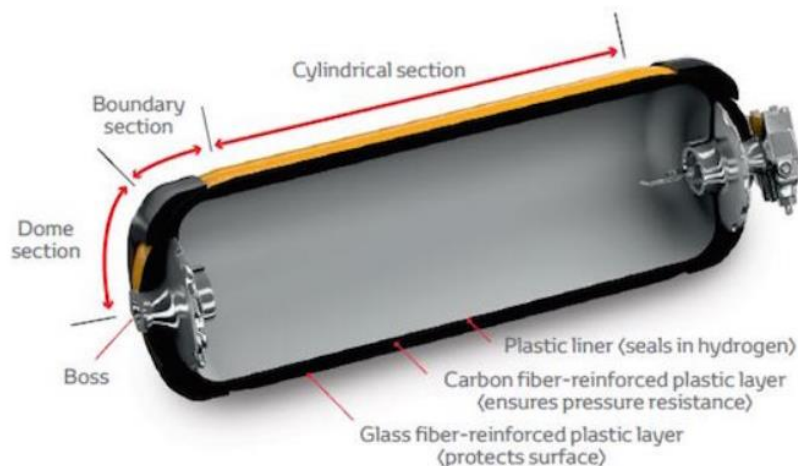


Figura 1.2. Dipòsit d'hidrogen. Font: [10].

## Distribució

L'hidrogen es pot transportar, principalment, de tres maneres diferents. Com a gas comprimit, en forma de líquid criogènic i com a sòlid en forma d'hidrur metàl·lic. La



metodologia que s'esculli dependrà principalment de la forma de consum final. En el cas de l'automoció el consum es realitza en forma de gas comprimit de manera que s'utilitzarà el mètode de transport fent ús de gasoductes que és la metodologia més econòmica per al transport de grans quantitats d'hidrogen [11].

En conclusió, tot i tenir inconvenients en el transport i l'emmagatzematge, els avantatges que pot proporcionar implementar l'hidrogen com a vector energètic i en conseqüència, utilitzar-lo com a combustible per a vehicles híbrids, són molt més grans.

Malgrat que actualment el preu de l'hidrogen verd (hidrogen generat amb energia renovable i no contaminat) es situa entre els 3,5 i 5 €/kg, amb l'augment del pes de les energies renovables en el còmput total de generació, aquest valor es podria reduir fins a situar-se per sota del preu dels combustibles fòssils.

Un dels principals inconvenients resideix en la manca de punts de recàrrega per a vehicles d'hidrogen. No obstant, de la mateixa manera que cada dia s'instal·len més punts de recàrrega per a vehicles elèctrics, és qüestió de temps i de que els governs imposin polítiques a favor, que s'instal·lin hidrolineres i es faciliti l'accés a aquest recurs. En aquest sentit es preveu que al 2050 l'hidrogen representi un 14 % de la energia primària mundial tal i com es pot observar a la Figura 1.3. en la que es poden veure els objectius a nivell mundial pel desenvolupament de l'hidrogen [12].

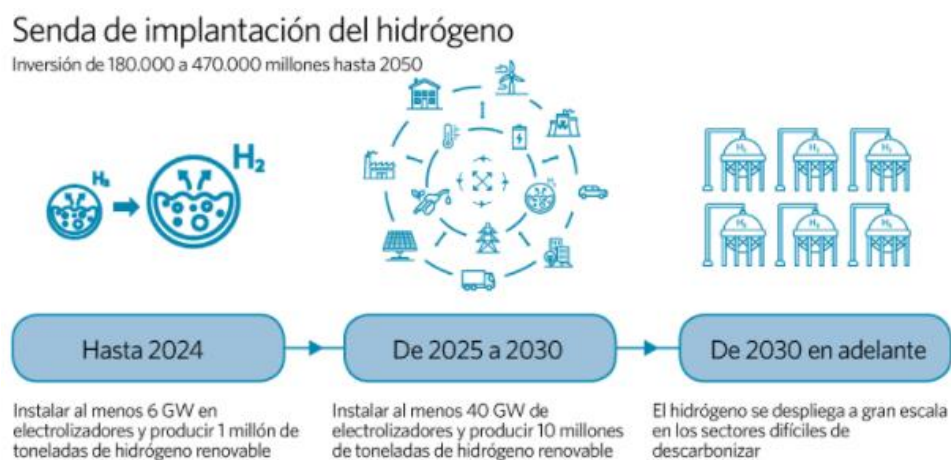


Figura 1.3. Perspectives del desenvolupament de l'hidrogen. Font: [13].

## 1.4. Alternatives al vehicle de combustió

Tal i com s'ha comentat, a Europa i a nivell mundial el sector del transport és un gran productor de CO<sub>2</sub> considerant-se responsable de l'emissió de gran part dels gasos d'efecte hivernacle. Això ha creat una tendència cap a l'ús de vehicles més eficients i que generin menys emissions. Com a alternatives viables al motor de combustió existeixen les següents opcions [14][15]:

- Vehicles elèctrics purs.
- Vehicles híbrids.
- Vehicles propulsats per combustió d'un gas.

#### 1.4.1. Vehicle elèctric pur (BEV)

Són vehicles elèctrics purs aquells en que la propulsió ve donada exclusivament per un o més motors elèctrics. El primer vehicle d'aquest tipus es va fer al 1884 tot i que amb la millora de carreteres i l'augment de les distàncies de transport van quedar en desús a causa de les limitacions en qüestions d'autonomia i de possibilitats de recàrrega i es van substituir per vehicles de combustió interna. Actualment, aquests limitants van desapareixent poc a poc i els vehicles elèctrics van guanyant terreny respecte els de combustió.

No obstant segueixen presentant una sèrie d'inconvenients, com per exemple, el preu, l'autonomia i el temps de recàrrega. A més, avui dia encara es dona el que es coneix com efecte garatge que implica que una persona no es comprarà un vehicle elèctric pur si no compta amb una plaça fixa amb disponibilitat de càrrega de vehicles.

A la figura 1.4. es pot veure el grau d'importància que els compradors li donen a cadascun d'aquests inconvenients.

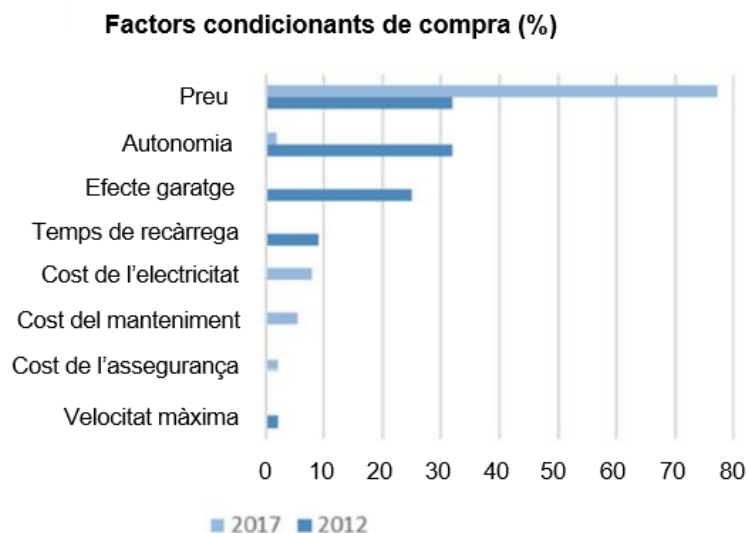


Figura 1.4. Influència dels factors que més afecten a la compra d'un vehicle elèctric pur. Font: [16].

Tot i els inconvenients que tenen, és important esmentar que el manteniment d'aquest tipus de vehicles és més econòmic que els de combustió ja que tenen menys peces mòbils i en conseqüència, menys desgast i menys manteniment.

### 1.4.2. Vehicles híbrids

Els vehicles híbrids són aquells propulsats per dos fonts d'energia diferents ja siguin combustibles fòssils, hidrogen utilitzat com a combustible tèrmic o per alimentar la pila de combustible o electricitat emmagatzemada en bateries.

S'acostuma a combinar una font amb una capacitat de generació i una autonomia determinades juntament amb bateries, per tal de millorar les característiques del sistema.

La principal virtut d'aquests vehicles és que compten amb diferents fonts d'energia, de manera que tenen els avantatges d'aquestes reduint el consum i augmentant l'autonomia. Tanmateix, això implica un control més complex i un augment del cost final del vehicle.

Existeixen diferents tipologies de vehicles híbrids. En primer lloc, per tal de falsejar les dades de generació de gasos contaminants, existeix l'anomenada hibridació lleugera. Aquests vehicles funcionen amb una combinació entre motors de combustió i una petita bateria l'objectiu de la qual és emmagatzemar energia generada implementant el l'estratègia de frenat regeneratiu i alliberar-la a l'engegada i en moments de funcionament a baixes revolucions. Al no poder funcionar únicament amb motors elèctrics es considera una hibridació a molt baix nivell que no tindrà sortida en aplicacions futures i que redueix molt poc el consum de combustibles fòssils.

En segon lloc, amb més capacitat i autonomia elèctrica, existeixen els vehicles híbrids endollables (*plug-in hybrid electric vehicle*) que consten d'una bateria de capacitat mitjana que es pot recarregar. Aquets vehicles tenen dos modes de conducció, el primer, en que el vehicle funciona amb el motor de combustió, i el mode elèctric, en que funciona amb l'energia emmagatzemada a les bateries. Aquesta classe de vehicles acostuma a ser més econòmica que els elèctrics purs ja que no necessiten una capacitat d'emmagatzematge tant elevada i per tant, el cost final associat a la bateria és menor.

Pel que fa als vehicles híbrids amb pila de combustible, utilitzen com a combustible l'hidrogen diatòmic. Consten de dipòsits on s'emmagatzema aquest element, una pila de combustible com a generador elèctric i bateries com a mitjà per cobrir els pics de potència de la demanda.

Aquests vehicles tenen un preu molt elevat a causa de les bateries i la pila d'hidrogen. A més, tal i com s'exposa a l'apartat 1.3.1. d'aquest document, el preu de l'hidrogen encara és molt elevat i no hi ha suficients punts de recàrrega d'hidrogen per implementar aquest tipus de vehicle al mercat de manera satisfactòria.

D'altra banda, no generen contaminació acústica ni alliberen gasos d'efecte hivernacle i tenen una eficiència molt elevada, a més com a únic residu generen vapor d'aigua.

Es pot concloure que aquests vehicles, pel que ja s'ha vist pel que fa a les possibilitats de l'hidrogen i gràcies a fer ús d'una tecnologia respectuosa amb el medi ambient, tenen unes perspectives a mitjà i llarg termini molt positives.

#### 1.4.2.1. Tren de potència del vehicle híbrid

Depenent de la interconnexió entre les fonts del tren de potència d'un vehicle híbrid existeixen diferents categories [4][17]:

##### Connexió sèrie

Consisteix en la interconnexió de diverses fonts de potència en un únic "camí" per a la transmissió d'energia en el tren motor de manera que totes actuïn sobre la càrrega.

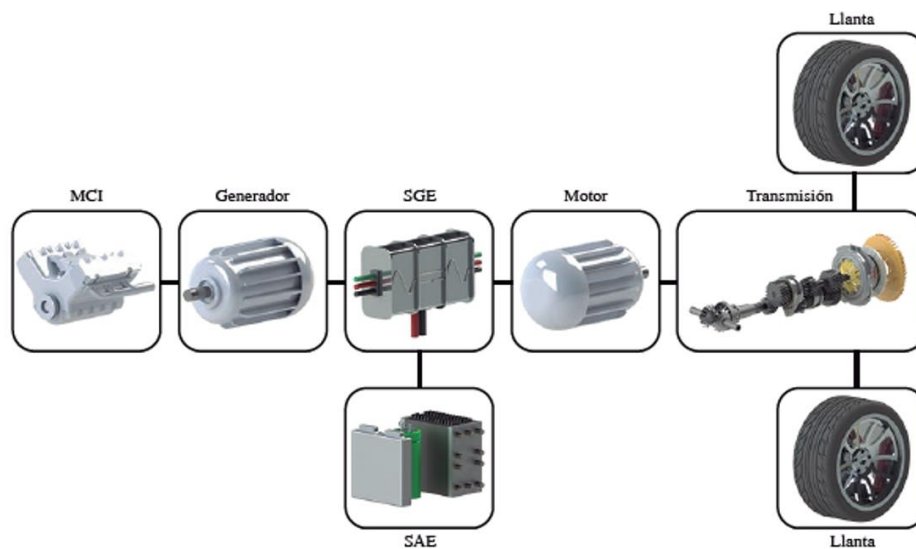


Figura 1.5. Tren de potència sèrie d'un vehicle híbrid. Font: [17]

En el cas que ocupa aquest projecte aquesta tipologia consistiria en la pila de combustible i la bateria connectats al convertidor i aquest al motor.

Depenent del mode de funcionament es poden donar diferents estats:

- Mode elèctric, en que es fa ús únicament de l'energia emmagatzemada a les bateries.
- Mode de frenat regeneratiu, en que es carreguen les bateries fent ús de l'energia cinètica del vehicle.
- Mode híbrid, en que l'energia requerida pels motors és molt elevada i s'utilitza, a més de la potència lliurada per les bateries, la potència del generador elèctric.

- Mode de recàrrega, en el qual el motor no sol·licita molta potència de manera que s'utilitza la de les bateries i a més aquestes es van carregant amb l'energia provinent del generador.

Aquesta configuració facilita que la pila de combustible, al no estar connectada directament al sistema de tracció del vehicle, actuï a regim constant de manera que s'augmenta el seu rendiment. A més, el sistema de control és senzill comparat amb les altres configuracions. Aquest mode proporciona un rendiment elevat en règims de conducció intermitents i molta flexibilitat en quant a la ubicació física dels elements constituents del tren de potència.

D'altra banda, s'haurà de sobredimensionar la capacitat del generador per proporcionar una velocitat constant en regim continu elevada, de manera que s'ha de trobar l'equilibri òptim entre el sistema d'emmagatzematge, el motor i el generador.

### Connexió paral·lel

En aquest cas es connecten les dues fonts al tren de potència del sistema de manera que creen dos "camins" diferenciats per transmetre l'energia a la càrrega. Tal i com es pot veure a la Figura 1.6. hi ha instal·lat un sistema separador de potència (*Power Split Device*) que permet aquesta selecció de font energètica.

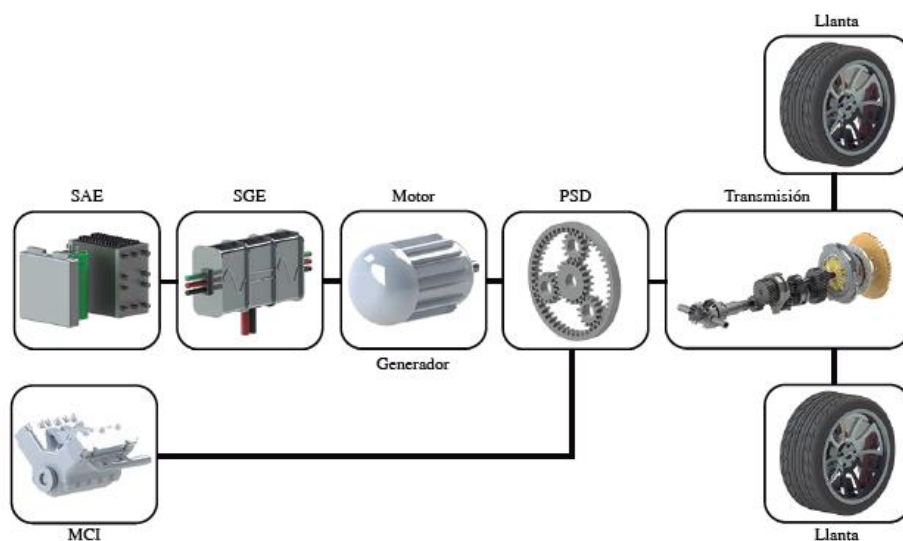


Figura 1.6. Tren de potència paral·lel d'un vehicle híbrid. Font: [17].

De la mateixa manera que pel cas anterior es poden establir diferents modes d'operació per als diferents requeriments de funcionament i estat de càrrega de les bateries.

- Mode convencional: la transmissió s'alimenta únicament amb el motor de combustió interna.

- Mode elèctric: la transmissió s'alimenta amb l'energia proporcionada pel sistema de generació d'energia elèctrica.
- Mode híbrid: tant el sistema elèctric com el sistema de combustió interna treballen conjuntament per suplir les necessitats de la càrrega reduint, d'aquesta manera, el consum de combustibles fòssils.
- Estat de recàrrega: s'utilitza el mode convencional però amb la millora de que amb l'energia sobrant es carreguen les bateries del sistema elèctric.
- Mode de frenat regeneratiu: no es requereix potència del motor de combustió interna i a més es fa ús de l'energia cinètica del vehicle per tal de carregar les bateries.

El principal avantatge d'aquesta configuració consisteix en que hi ha menys pèrdues en el sistema de conversió d'energia ja que el sistema de generació tèrmic es connecta directament al tren de potència.

Altrament, els sistemes de regulació i control del vehicle híbrid són més complexes, amb el consegüent augment dels costos que això comporta.

### Connexió mixta

Aquesta configuració és una barreja entre les dues anteriors de manera que es creen tres "camins" per alimentar d'energia la càrrega del sistema. La Figura 1.7. il·lustra cadascun d'aquests.

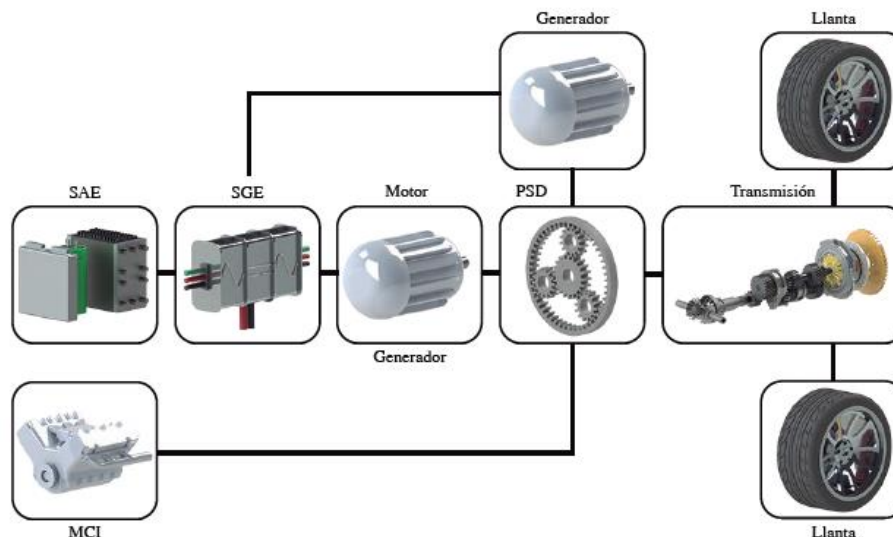


Figura 1.7. Tren de potència mixt d'un vehicle híbrid. Font: [17].

Amb aquesta configuració s'obtenen els beneficis propis de les dues configuracions per separat a més de presentar una connexió mecànica directa addicional entre el generator i el motor de tracció amb la qual cosa es pot reduir el consum de combustible.

D'altra banda, presenta uns costos més elevats que els de les dues configuracions alternatives per separat i una complexitat de control igualment elevada.

## 1.5. Components del vehicle híbrid d'hidrogen

Per entendre el cas pràctic que es tracta en aquest treball, es considera de vital importància definir, tot i que sigui a grans trets, el funcionament, fonaments físics i característiques dels seus components. Així doncs, en aquest apartat, es procedeix a explicar les parts més representatives del vehicle híbrid amb pila de combustible d'hidrogen.

### 1.5.1. Pila de combustible

El principal mitjà de propulsió que utilitzarà un vehicle híbrid de les característiques estudiades en aquest document és, efectivament, la pila de combustible d'hidrogen.

Una pila de combustible (*fuel cell*) és un dispositiu que permet la conversió d'energia química a energia elèctrica. Aquest procés es porta a terme gràcies a una reacció de reducció-oxidació, anomenada redox, en la que es dona un flux d'intercanvi d'electrons.

Els components bàsics d'aquest element són les cel·les que estan formades, tal i com es veu a la Figura 1.8., en primer lloc, pels elèctrodes, un positiu, anomenat càtode, que està en contacte amb l'agent oxidant, i un negatiu, l'ànode, en contacte amb l'agent reductor. I en segon lloc, per una membrana o electròlit que té la funció de separar els reactius de l'ànode i el càtode, permetent únicament el pas de ions. D'aquesta manera es força la circulació d'electrons per un circuit tancat extern obtenint corrent elèctric.

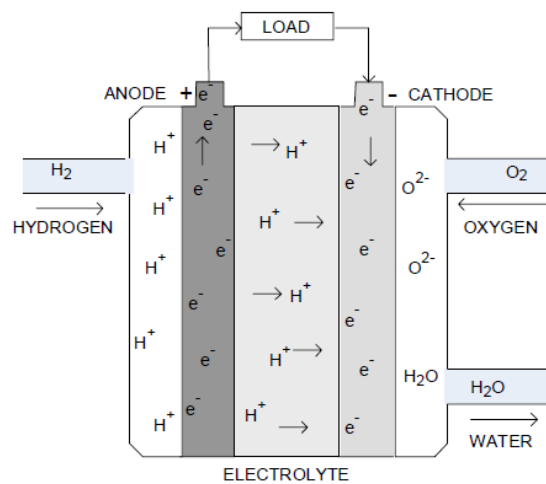


Figura 1.8. Esquema d'una cel·la de combustible. Font: [18].

Cada cel·la es pot associar en sèrie i paral·lel amb altres de manera que es poden aconseguir piles de combustible de diferents mides i densitats energètiques.

A més, pel correcte funcionament d'aquest tipus de dispositius s'ha de fer ús d'una sèrie de components que, juntament amb les cel·les de combustible, conformen la pila de combustible. A aquestes parts o processos se'ls coneix com a Balanç de Planta (*Balance of Plant*) i principalment són [7]:

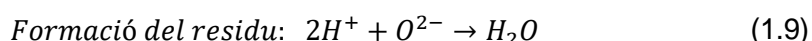
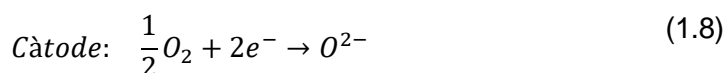
- Subministrament d'aire: s'ha d'aportar aire a l'interior de la pila de combustible per tal que la reacció es dugui a terme de la manera més efectiva. Aquest subministrament es realitza mitjançant compressors o bufadors.
- Refrigeració: la reacció que es dona a la pila de combustible és de naturalesa exotèrmica de manera que, per no passar els nivells de temperatura que els components de la pila poden aguantar, s'ha de refrigerar de forma adequada. Aquest procés es porta a terme, normalment, fent ús dels mateixos bufadors que s'utilitzen per al subministrament d'aigua.
- Administració del residu: l'aigua generada en el procés es podrà evacuar utilitzant-la com a refrigerant o com a humidificador de la membrana d'intercanvi de protons.
- Condicionament de l'energia: l'energia pot no tenir la magnitud o naturalesa (de corrent continua) que es desitja i, per tal de minimitzar aquests inconvenients, es fa ús de diferents convertidors de potència.
- Aprofitament de l'energia tèrmica generada: al tractar-se d'una reacció exotèrmica es genera una gran quantitat de calor que, en el cas de vehicles o habitatges, pot ser utilitzada com a font tèrmica per a la calefacció, o en el cas de centrals a més gran escala, per generar vapor i electricitat a partir d'aquest.

Existeixen altres dispositius, com alguns tipus de bateries, que basen el seu funcionament en les reaccions redox per tal de subministrar electricitat. No obstant, hi ha particularitats que en diferencien el seu funcionament. En primer lloc, la pila de combustible és considerada una eina que permet convertir l'energia (*Energy Conversion Device*) de manera que pot subministrar electricitat sempre que hi hagi reserves de combustible, per altra banda, les bateries són elements que permeten l'emmagatzematge de l'energia (*Energy Storage Device*) de manera que tota l'energia de la que es disposa està dins el mateix dispositiu. En segon lloc, els elèctrodes de les bateries es consumeixen amb el seu ús fins que s'esgoten mentre que, en el cas d'una pila de combustible, ni els elèctrodes i ni l'electròlit reaccionen en el procés si no que únicament serveixen com a mitjà per tal que l'oxidant i el reductor interactuïn.

El funcionament de la pila de combustible d'hidrogen es basa, com ja s'ha comentat, en reaccions de reducció i oxidació que es donen al seu interior. En concret la reacció segueix el següent procés. Primerament una molècula d' $H_2$  entra en contacte amb l'ànode de



manera que cedeix els dos electrons de que disposa, el quals, a través del circuit extern arriben al càtode, unint-se amb les molècules d'O<sub>2</sub> que hi ha disponibles a l'aire i generant O<sup>2-</sup>. Les característiques de l'electròlit d'aquest tipus de dispositius permeten el pas de l'ió negatiu d'oxigen que, al ajuntar-se amb 2H<sup>+</sup>, genera H<sub>2</sub>O com a residu de la reacció. Aquesta reacció consta de dues semi-reaccions tals que, una es dona a l'ànode i l'altra al càtode:



El principal avantatge de les piles de combustible radica en el fet que permet transformar directament l'energia química en energia elèctrica sense la necessitat de passar per estadis entremitjos. Això presenta millores significatives en quant a eficiència i simplicitat, a més de ser una de les fonts energètiques més netes.

L'eficiència d'aquesta tipologia de dispositius pot arribar a valors superiors al 60%, un valor molt elevat si es compara amb altres formes de generació, com les centrals de cicle combinat o la generació fotovoltaica [19].

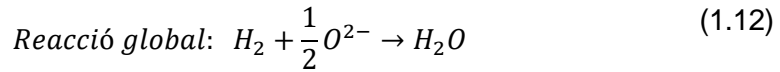
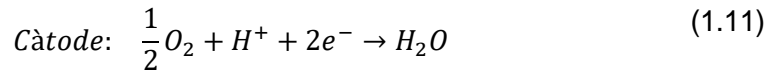
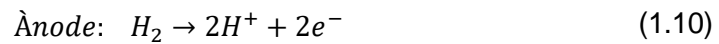
A més, el procés de generació d'electricitat és net ja que no es generen emissions de gasos d'efecte hivernacle. Únicament, i com ja s'ha comentat anteriorment a l'apartat de 1.3.1, s'ha de tenir en compte que l'energia primària empleada per a la generació de l'hidrogen provingui de fonts netes i no contaminats. I l'absència de components mòbils en el seu funcionament implica una reducció dels costos de manteniment respecte altres metodologies de generació.

Les piles de combustible utilitzades avui dia es poden classificar de dues maneres. Segons la temperatura a la que operen, formant dos grups, les que operen a baixes temperatures (60°C a 200°C) i les que operen a altes temperatures (entre 600°C i 1000°C). I segons la tipologia d'electròlit que utilitzen, existeixen, segons aquesta classificació, les piles àcides i les piles alcalines.

Les piles més utilitzades en vehicles són les que operen a baixes temperatures. Algunes d'aquestes són [18]:

### **PEMFC (*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells*)**

Es caracteritzen per tenir una membrana formada per material polimèric que permet el pas dels protons d'hidrogen a més d'elèctrodes de carboni dopats amb platí que accelera la reacció redox.



Aquesta tipologia de membrana opera a baixes temperatures, entre 60 i 80°C. A la Figura 1.9. s'esquematitza el funcionament de la pila PEMFC.

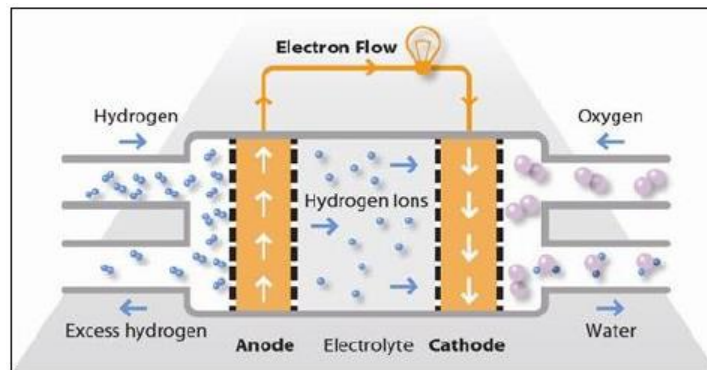


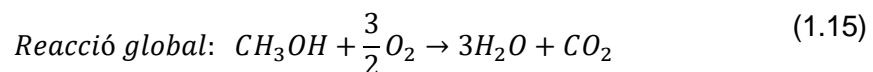
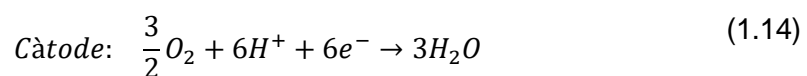
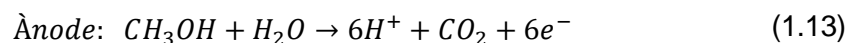
Figura 1.9. Esquema del funcionament d'una PEMFC. Font: [7].

Gràcies a les baixes temperatures a les que pot operar aquest tipus de pila s'acostuma a utilitzar en dispositius que no requereixen potències molt elevades.

Cal destacar que el govern dels Estats Units ha utilitzat aquest tipus de piles en les seves xarxes d'autobusos, així com els fabricants de vehicles Honda i Toyota que han començat a utilitzar aquesta tecnologia pel desenvolupament d'alguns models de vehicles híbrids.

### **DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)**

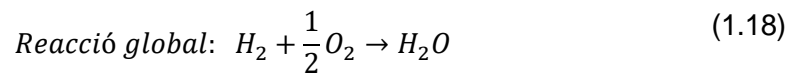
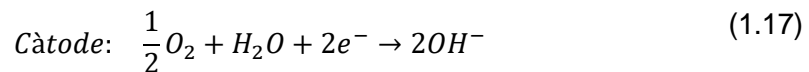
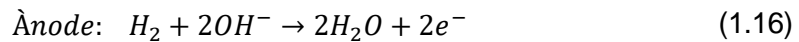
El seu funcionament segueix el mateix patró que la PEMFC i els components que la formen són els mateixos. No obstant, aquesta variant utilitza com a combustible metanol ( $CH_3OH$ ) que es pot emmagatzemar i transportar fàcilment (entre -97 i 64,7 °C a pressió atmosfèrica) a diferència de l'hidrogen. Per altra banda, amb aquest tipus de pila no s'aconsegueix generar potències molt elevades. La reacció química que es dona a la pila és la següent:



I la seva temperatura d'operació és una mica més elevada que per la tipologia vista anteriorment, situant-se entre els 60 °C i els 130 °C.

### **AFC (Alkaline Fuel Cell)**

Aquesta pila utilitza solució alcalina com a electròlit i es dopa l'ànode amb platí. A causa de les variacions en els components que la formen la reacció que es du a terme en el procés de generació d'electricitat és una mica diferent que en les piles PEMFC.

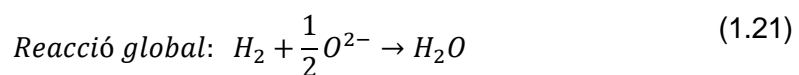
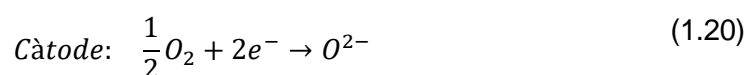
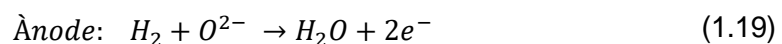


En aquest cas s'utilitza hidrogen com a combustible i la seva temperatura d'operació està entre els 100 i 250 °C fent que, a causa d'aquest augment de temperatura respecte els casos anteriors, la pressió de treball augmenti per tal d'evitar la evaporació de l'electròlit. Les piles AFC són les més econòmiques en quant a la seva fabricació ja que únicament necessiten platí a l'ànode. I el rang de potència en el que operen està entre els 300 W i els 10 kW.

Les seves aplicacions es centren en la mobilitat de vehicles tant terrestres com aquàtics i en aplicacions per a la generació distribuïda.

### **SOFC (Solid Oxide Fuel Cells)**

Estan formades per materials ceràmics sòlids la qual cosa en simplifica el funcionament. Aquestes piles s'alimenten amb aire en el càtode i hidrogen o gas natural a l'ànode. Les reaccions que es donen, utilitzant hidrogen com a combustible, són les que es veuen a continuació:



A causa de les altes temperatures d'operació rarament s'utilitza com a alternativa per a l'alimentació de vehicles elèctrics. Malgrat això, hi ha alguns fabricants que s'han decantat

per l'ús d'aquesta tipologia pel seu elevat rendiment. A més, la potència a la que opera aquest es situa al voltant dels 100 kW. A la Figura 1.10. es pot veure l'esquema de funcionament que segueix aquesta pila.

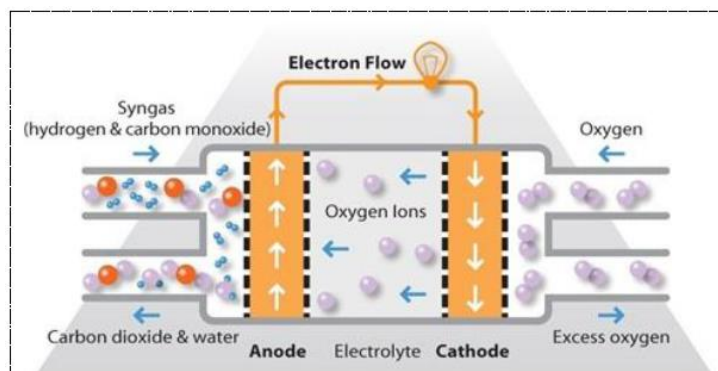


Figura 1.10. Esquema de funcionament d'una SOFC. Font: [7].

A continuació s'exposa una taula resum amb les principals característiques de les diferents tipologies de piles de combustible exposades:

Taula 1.1 Característiques principals de diferents piles de combustible. Font: [18].

Tecnologia	PEMFC	DMFC	AFC	SOFC
<b>Electròlit</b>	Membrana polimèrica	Membrana polimèrica	Hidròxid alcalí	Òxids ceràmics
<b>Ànode</b>	Carboni dopat amb platí	Carboni dopat amb platí	Carboni dopat amb platí	Sòlids metàl·lics
<b>Càtode</b>	Carboni	Carboni	Níquel	Níquel
<b>Catalitzador</b>	Platí	Platí	Platí, Níquel	Níquel
<b>Combustible</b>	Hidrogen	Metanol	Hidrogen	Gas de síntesis
<b>Ió</b>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	O <sup>-</sup>
<b>Potència (kW)</b>	50-250	~ 0,1	0,3-10	~ 100

### 1.5.2. Bateria

Els objectius de la bateria seran principalment dos, suplir els pics de demanda de la càrrega i absorbir l'energia generada, pel motor quan s'apliqui l'estratègia de frenat regeneratiu i per la pila de combustible en moments de baixa demanda energètica. Això permet no haver de sobredimensionar la pila de combustible, augmentar el rendiment del sistema en general i facilita el funcionament de la pila a un règim de generació menys variant que en el cas de no disposar de bateries.

Com a sistemes d'emmagatzematge, existeixen diferents metodologies i funcionaments tal i com es pot veure a la Figura 1.11.

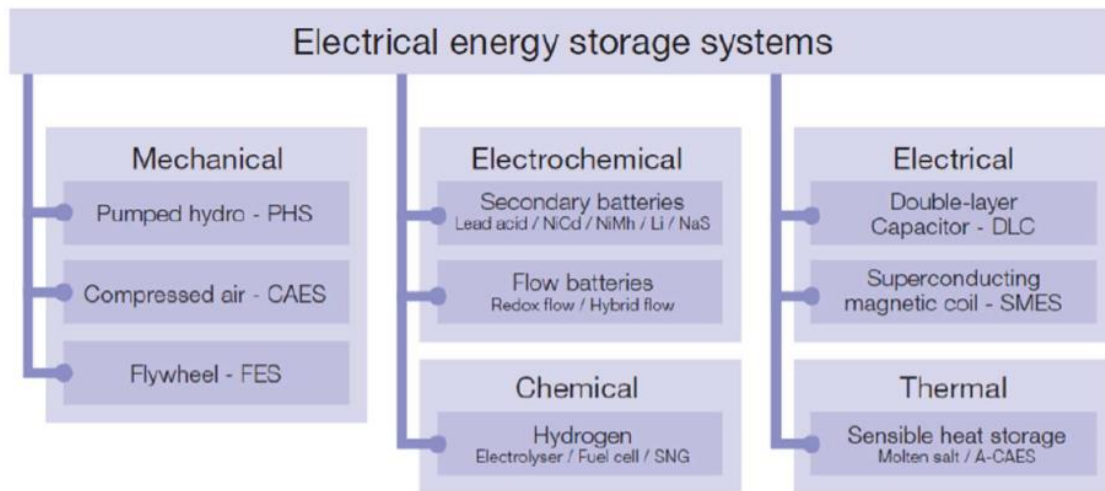


Figura 1.11. Metodologies d'emmagatzematge d'energia. Font: [20].

Per l'aplicació que ocupa aquest projecte el sistema de més rellevància és la bateria, formada per un conjunt de cel·les i que s'utilitza amb la finalitat de convertir energia elèctrica en energia química i aquesta en energia elèctrica en els processos de càrrega i de descàrrega respectivament.

Les bateries es poden representar com la unió de tres parts. El mitjà físic que permet emmagatzemar energia, les cel·les electroquímiques. En segon lloc, el sistema que serveix per transformar l'energia emmagatzemada en energia elèctrica, que es coneix com sistema de conversió de potència i per últim, el sistema de control.

El mitjà físic pot ser de diferents tipologies depenent de la tecnologia de la bateria. Existeixen dos variants, les primàries, que no es poden recarregar i que, conseqüentment, no seran útils per a l'aplicació objecte d'estudi i les bateries secundàries, que permeten la càrrega i descàrrega de manera repetida un nombre finit de vegades [21].

Cada cel·la està formada per diferents elements [20]:

- L'ànode, anomenat elèctrode negatiu o combustible que, en el procés de descàrrega, cedeix electrons i s'oxida durant la reacció electroquímica per alliberar electrons a partir de l'energia química emmagatzemada.
- El càtode o elèctrode positiu que, en el procés de descàrrega, absorbeix electrons i es redueix.
- L'electròlit que permet la transferència d'ions entre l'ànode i el càtode.

Les bateries secundàries funcionen mitjançant el principi químic de les reaccions redox, i es caracteritzen segons una sèrie de paràmetres, els principals dels quals es llisten a continuació [20]:

- Capacitat: quantitat d'energia que pot emmagatzemar o de la que disposa en un moment determinat cada cel·la.
- Estat de càrrega (*State of Charge*, SoC): és un valor que indica l'estat de càrrega de la bateria. Per tal d'allargar la vida útil de la bateria és aconsellable establir un SoC mínim.
- Tensió de buit: tensió entre els terminals de la bateria quan es troba en circuit obert.
- Energia específica: energia que pot arribar a emmagatzemar per unitat de massa (Wh/kg).
- Auto-descàrrega: magnitud que mesura la pèrdua de càrrega de la bateria quan es manté en circuit obert un període de temps determinat.
- Profunditat de descàrrega (*Depth of Discharge*, DoD): és el valor complementari a l'estat de càrrega i permet imposar un valor màxim de descàrrega de les bateries determinat.
- Vida útil: aquesta magnitud indica el nombre de cicles de càrrega i descàrrega que pot suportar una bateria sense perdre la seva capacitat d'emmagatzematge. El seu valor pot variar en funció de la temperatura de funcionament i el DoD fixat.

Les característiques elèctriques de cada bateria depenen, en primera instància, de la tecnologia utilitzada per a la seva fabricació. En el cas dels vehicles híbrids, les bateries empenen tecnologia de Plom àcid (Pb), níquel-metal hidrur (Ni-MH), polímers de liti (LiPo) i ions de liti (Li-Ió), tot i que la més utilitzada és aquesta última.

### 1.5.3. Motor elèctric

Així com el vehicle convencional converteix l'energia del combustible en energia mecànica mitjançant un motor de combustió, el vehicle híbridat amb pila de combustible ho fa amb el motor elèctric. Així doncs, és un element indispensable per aquesta tipologia de sistemes ja que no requereix combustibles fòssils pel seu funcionament.

Permet complir el principal objectiu de la implantació dels vehicles híbrids de pila de combustible al parc automobilístic mundial, el de no generar gasos d'efecte hivernacle. Per altra banda compta amb un rendiment més elevat que els de combustió i no genera contaminació acústica. A més, cal remarcar que el seu manteniment és molt menor que en el cas dels motors de combustió ja que consta de menys peces i, en conseqüència, hi ha

menys possibilitats de que s'avarii o es desgasti. A mode il·lustratiu s'exposa, a la Figura 1.12. la comparativa entre les peces d'un motor síncron d'imants permanents i un motor de combustió interna.



Figura 1.12. Comparativa entre el nombre de peces en un motor elèctric i en un motor de combustió. Font: [22].

Els motors més utilitzats en el món de l'automoció són, el motor de corrent continu, el motor d'inducció, el motor síncron d'imants permanents i el motor de reluctància variable, presentant, cascun d'aquests, avantatges i inconvenients que fan que cap es posicioni per sobre els altres de manera definitiva.

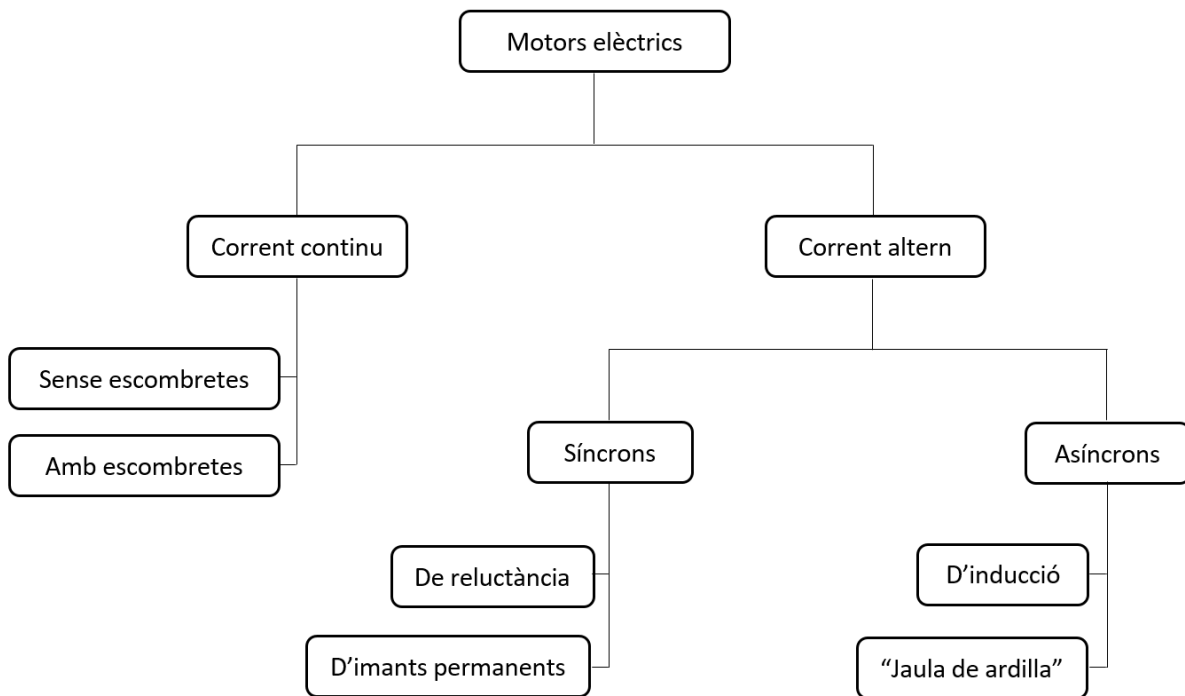


Figura 1.13. Classificació dels motors elèctrics. Font: [22].

Els requisits més importants a tenir en compte pels motors utilitzats en aquest cas són:

- Una alta densitat de potència que permeti reduir el volum i el pes del motor.
- Un ampli rang de velocitats d'operació i un alt rendiment en aquest rang.
- Un elevat parell a baixes velocitats per permetre una bona acceleració.
- Poca inèrcia per proporcionar una resposta ràpida.
- Cost no molt elevat que no encareixi de manera desproporcionada el preu del vehicle.

És molt important per aquesta aplicació que el motor pugui treballar correctament per sobre de la velocitat nominal, tot i que en aquest règim doni menys parell. A la Figura 1.13. es pot veure una classificació general dels motors elèctrics, útil per tal que el lector es faci una idea de la gran varietat i diferents tipologies existent.

#### **1.5.4. Altres components**

Amb la finalitat de complementar el funcionament dels components definits fins aquest punt es requeriran una sèrie d'elements. Les funcions d'aquests elements seran de tipologies diferenciades contemplant-se des de la conversió de potència pel correcte acoblament de les diferents fonts, fins al control o l'estratègia de gestió, entre altres.

En qualsevol cas hauran de complir amb les característiques següents:

- Velocitat de resposta.
- Baix consum energètic.
- Llarga vida útil.
- Baix cost.

##### **1.5.4.1. Convertidor**

Per tal de transmetre l'energia correctament entre la bateria, la pila de combustible i el motor és necessari l'ús de convertidors de potència. Aquest element està fet a partir de la unió de diferents semiconductors que permeten, al convertidor en qüestió, controlar la potència de sortida i les seves característiques a partir d'una determinada potència d'entrada i una senyal de modulació. La seva funció és la de variar les característiques d'amplitud i continuïtat d'una senyal determinada.

En funció dels senyals d'entrada i sortida existeixen diferents tipologies de convertidors estàtics, cadascun amb les seves característiques de funcionament:

- Els onduladors, necessaris per generar una ona amb una freqüència i amplitud determinades a partir d'una senyal continua i constant.



- Els rectificadors, són el cas oposat als onduladors. Permeten generar una senyal de valor relativament constant a partir d'una senyal alterna.
- Els reguladors o cicloconvertidors que transformen de corrent altern a corrent altern.
- Els trossejadors, que permeten transformar un corrent continu amb tensió constant en corrent continu amb una tensió variable.

Aquests elements serviran doncs, per alimentar amb una determinada potència el motor controlant el parell generat. Permetran també el flux d'energia bidireccional entre la bateria i la resta del vehicle de manera que aquesta es pugui recarregar quan funcioni en regim de frenat regeneratiu.

A la Figura 1.14. adjunta a continuació es poden veure els convertidors necessaris per a la correcta circulació de l'energia entre els diferents components d'un vehicle híbrid.

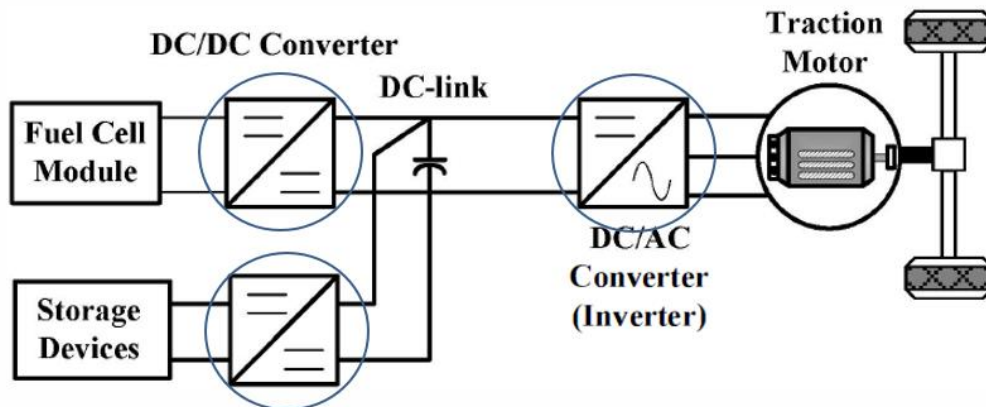


Figura 1.14. Convertidors en un vehicle híbridat amb pila de combustible. Font: [23].

#### 1.5.4.2. Control

En un vehicle el funcionament del qual es basi en l'electricitat, es requerirà d'un cert nivell de control que permeti modificar la velocitat, parell i acceleració donats pel motor elèctric de manera que s'arribi a la velocitat de referència marcada pel conductor.

#### 1.5.4.3. Estratègia de gestió

Per augmentar el rendiment del sistema tot millorant les característiques de funcionament, es necessita un sistema de gestió que controli l'ús de l'energia, la font que l'allibera i el moment en que ho fa, de manera que hi hagi consens entre les diferents parts del vehicle.

El sistema de gestió imposarà una determinada estratègia fent complir els requeriments que el fabricant cregui oportuns, com podria ser, la limitació del corrent de les bateries o de

la pila, l'estalvi de combustible o la limitació de la potència entregada per la pila de combustible, entre altres.

El dimensionat dels components del sistema vindrà determinat en gran mesura per l'estratègia fixada a més de per la potència del vehicle.

## 2. Cas pràctic: Modelització d'un vehicle

En aquest apartat es desenvoluparà un model que permeti analitzar el comportament energètic d'un vehicle híbrid alimentat amb pila de combustible d'hidrogen i bateries.

El model del vehicle s'implementa fent ús del mètode de representació EMR (*Energetic Macroscopic Representation*), que permet, en primer lloc, construir i analitzar el sistema en petits blocs per entendre millor el seu funcionament i en segon lloc, unificar-los de manera que actuïn com un sistema complert en el que cada bloc genera una reacció als seus adjacents.

Finalment, per analitzar el model s'utilitza el perfil de velocitats WLTP, un dels més utilitzats pels fabricants de vehicles per estudiar el consum d'un model i comprovar que es compleixen les normatives vigents. A més, també s'analitzen diferents modes de conducció amb unes característiques de velocitat, acceleració i pendent definits.

Cal determinar una estratègia de gestió d'energia per imposar la participació de cada una de les fonts en l'alimentació de la càrrega. Això es fa amb la finalitat d'aconseguir equilibri en el dimensionat d'aquestes, evitant haver de disposar d'un banc de bateries amb molta capacitat d'emmagatzematge o d'una pila de combustible amb una capacitat de generació molt elevada, la qual cosa encarriria el cost del vehicle.

### 2.1. Eines per a la modelització

#### 2.1.1. Matlab Simulink

Pel desenvolupament del model energètic del vehicle híbrid es fa ús de l'eina Simulink del programari Matlab. Aquest entorn permet crear models que simulen sistemes reals mitjançant les expressions matemàtiques necessàries, a més de ser un entorn gràfic molt intuïtiu a l'hora de programar.

#### 2.1.2. EMR

Per a la implementació del vehicle fent ús de la metodologia EMR s'ha de descompondre el sistema en diferents subsistemes bàsics de manera que cadascun d'aquests modelitza el comportament d'una part del cotxe.

Aquesta eina posa a disposició de l'usuari diferents tipologies de blocs, cadascun amb una forma i color determinats i amb una finalitat concreta. Els que es faran servir en aquest projecte són:

- Fonts: serveixen per modelitzar elements generadors o receptors d'energia.



- **Acumuladors:** l'ús de l'element que modelitza un acumulador comporta una determinada acumulació d'energia que pot tenir o no pèrdues. Aquests elements segueixen el principi de causalitat, això és, la sortida és funció integral de l'entrada. Una bobina o un condensador es podrien representar amb aquest tipus de subsistemes.
- **Convertidors:** en aquests blocs es porta a terme una determinada conversió d'energia sense acumulació que, com en el cas anterior, pot tenir pèrdues o no. En aquest cas es pot representar tant per un quadrat com per una rodona representant respectivament conversions monofísiques, en les que tant a l'entrada com a la sortida hi ha el mateix tipus d'energia, o multifísica, en els que el tipus d'energia és diferent a l'entrada i a la sortida.

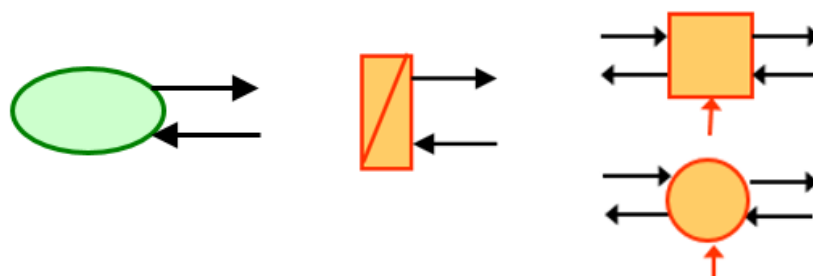


Figura 2.1. Elements de la cadena principal, d'esquerra a dreta, font, acumulador, convertidors.

Font: [24].

També existeixen els blocs d'acoblament que permeten distribuir l'energia en dos camins diferents. En aquest cas, aquest tipus de bloc serà útil en la distribució energètica entre el bloc de bateries i la pila de combustible, com es veure més endavant.

Aquesta metodologia segueix principalment tres principis [24], [25]:

- **El principi de causalitat:** defineix que la sortida d'un bloc serà la integral de les seves entrades. Això passarà únicament en els sistemes en els que hi hagi dependència amb el temps.
- **El principi d'inversió:** segons aquest principi el control es considera la inversió del sistema que es controla. Les relacions sense dependència del temps s'inverteixen directament, mentre que la inversió de les relacions amb dependència del temps es realitzen fent ús d'un controlador integral.
- **El principi d'acció i reacció entre elements connectats:** determina que entre dos blocs adjacents, si un genera una acció sobre un altre, aquest últim genera una reacció directament sobre el primer.

Així doncs, el control del sistema es realitzarà seguint el camí invers de la cadena principal tenint en compte els dos principis explicats, de manera que quan no existeixi dependència amb el temps la inversió serà directa i quan el bloc a invertir tingui aquesta dependència, la inversió es farà mitjançant un *closed-loop control* o inversió de llaç tancat. A la Figura 2.2. es poden veure els blocs a utilitzar a la cadena de control.

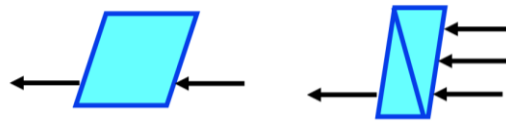


Figura 2.2. Elements de la cadena de control, d'esquerra a dreta, inversió directa i inversió amb control integral. Font: [24].

Les parts de les que consta el vehicle a modelitzar són, en primer lloc, la pila de combustible, la bateria i la càrrega, modelitzats com a elements font i, en segon lloc, els convertidors, el motor, la transmissió i el xassís, fent ús de blocs acumuladors i convertidors.

Tal i com es pot veure a la Figura 2.3. la bateria i la pila de combustible són els encarregats d'alliberar energia al sistema en el cas de la pila de combustible i d'alliberar i absorbir energia en el cas de la bateria. Els elements en groc, que representen parts físiques internes del vehicle, són els elements encarregats de la conversió i l'acumulació d'aquesta energia. Els elements en blau, s'encarreguen de la inversió i control de la cadena principal. I l'últim bloc, el bloc càrrega, modelitza les forces externes aplicades sobre la càrrega, en aquest cas, el vehicle.

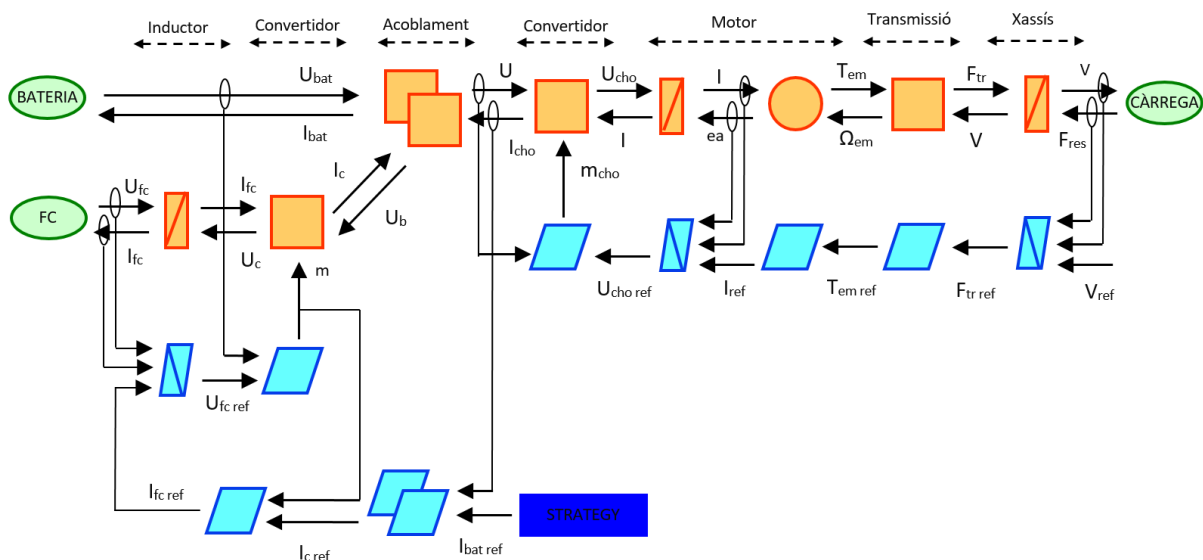


Figura 2.3. Model energètic d'un vehicle híbrid amb pila de combustible d'hidrogen i bateries. Font: [pròpia].

S'ha de tenir en compte que per a la modelització del sistema s'han negligit les pèrdues amb la finalitat de simplificar el model i assolir l'objectiu especificat a l'inici d'aquest document. Cal fer esment també que l'ús de la metodologia EMR permet reduir el nombre de sensors implementats, la qual cosa fa que es pugui simplificar el model.

## 2.2. Modelat del vehicle híbrid d'hidrogen

### 2.2.1. Càrrega

L'efecte del vehicle sobre el sistema es pot determinar definint les forces que actuen sobre la càrrega, de manera que es pugui conèixer l'energia necessària per assolir una velocitat i acceleració determinades.

Les forces que es contemplen en aquest model s'apliquen en un pla x-y, per tant no es tindran en compte les que es generarien sobre el vehicle, per exemple, en un canvi de direcció. Es fa així amb la finalitat de no complicar el model del vehicle, ja que l'objectiu no és el d'analitzar les forces que actuen sobre un aquest, sinó el d'estudiar el seu sistema energètic.

A la Figura 2.4. es poden veure les forces contemplades i definides a l'expressió 2.1 [26]:

$$F_T = F_I + F_R + F_W + F_G \quad (2.1)$$

On:

- $F_I$ : força resistiva de la inèrcia (N).
- $F_R$ : força resistiva del rodament (N).
- $F_W$ : força resistiva de l'aerodinàmica (N).
- $F_G$ : força resistiva de la gravetat (N).
- $F_T$ : força de tracció (N).

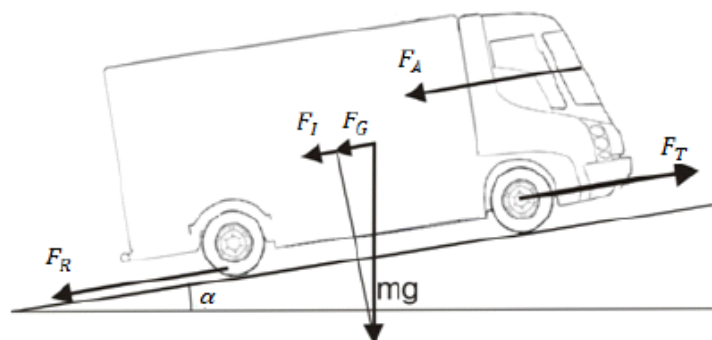


Figura 2.4. Diagrama de sòlid lliure d'un vehicle en moviment. Font: [27].

### 2.2.1.1. Resistència a causa de la inèrcia

És la força mitjançant la qual es té en compte el pes del vehicle i l'efecte que causa que aquest s'oposi a que el vehicle variï la seva velocitat, això és, adquireixi una determinada acceleració. Actua en sentit contrari a l'acceleració oposant-se a l'avenç del vehicle quan accelera i a l'aturada quan frena.

Depèn de la massa del vehicle, l'acceleració d'aquest i un coeficient que pretén simular la inèrcia dels elements del cotxe i que en aquest cas actua sobredimensionant la massa total. El seu càlcul queda definit a l'expressió 2.2.

$$F_I = m \cdot a \cdot (1 + x) \quad (2.2)$$

On:

- m: massa del vehicle (kg).
- a: acceleració del vehicle (m/s).
- x: terme associat als elements interns del vehicle.

### 2.2.1.2. Resistència al rodament

Es produeix pel contacte entre la roda i la superfície que aquesta trepitja i depèn del coeficient de resistència al rodament ( $f_r$ ) entre la carretera i el pneumàtic i la força normal generada pel pes del vehicle  $F_N$ .

El valor del coeficient de rodament varia en funció dels materials entre els que es genera el frec, la temperatura d'aquests, la pressió i la rugositat entre altres paràmetres. A la Taula 2.1 s'adjunten els valors que acostuma a tenir.

Taula 2.1. Valors típics del coeficient de resistència rodament. Font: [26].

Condicions	$f_r$
Pneumàtic en carretera de formigó o formigó asfàltic	0,5... 0,7
Pneumàtic en carretera de grava premsada	0,02
Carretera de quitrà	0,025
Camí de terra	0,05
Pista de terra	0,1 – 0,35

Existeixen diverses metodologies de càlcul per obtenir el valor de la resistència causada per aquest factor, no obstant pel càlcul del rendiment d'un vehicle, estudiat a grans trets, n'hi ha prou amb una equació lineal com la definida segons:

$$F_R = m \cdot g \cdot f_r \cdot \cos(\alpha) \quad (2.3)$$

On:

- $m$ : massa del vehicle (kg).
- $g$ : valor de la gravetat ( $m/s^2$ ).
- $f_r$ : coeficient de resistència al rodament.
- $\alpha$ : pendent del terreny ( $^\circ$ ).

Aquesta força s'oposa a la força de tracció del vehicle i es deu a la histèresis del material dels pneumàtics.

### 2.2.1.3. Resistència aerodinàmica

La resistència aerodinàmica és la que exerceix l'aire sobre el vehicle i pot ser negativa, si la velocitat relativa de l'aire és oposada a la del vehicle o positiva, si va en el mateix sentit que la força de tracció. Aquesta força resistiva té l'origen en dos fets:

- La fricció viscosa de l'aire en contacte amb la superfície del vehicle.
- La diferència de pressió entre l'aire davant i darrere del vehicle.

Creix o decreix seguint el comportament que marca la següent expressió:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_d \cdot (v - v_w)^2 \quad (2.4)$$

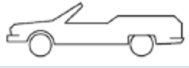





On:

- $\rho$ : densitat de l'aire a 25°C ( $kg/m^3$ ).
- $A_f$ : àrea frontal del vehicle ( $m^2$ ).
- $C_d$ : coeficient aerodinàmic del vehicle.
- $v$ : velocitat del vehicle (m/s).
- $v_w$ : velocitat del vent (m/s).

Com es pot veure a l'equació 2.4., el valor de la resistència aerodinàmica es determina, entre altres, a partir del paràmetre  $C_d$ . Aquest depèn del material i forma de la carrosseria del vehicle. Alguns valors típics es poden veure a la Taula 2.2.



Taula 2.2. Valors del coeficient aerodinàmic  $C_d$  segons el tipus de vehicle. Font: [26].

Tipus de vehicle		Coeficient aerodinàmic
	Descapotable	0,5... 0,7
	Carrosseria van	0,5... 0,7
	Carrosseria pronton	0,4... 0,55
	Forma de cunya	0,3... 0,4
	Forma k	0,23
	Disseny òptim	0,15... 0,20

#### 2.2.1.4. Resistència a causa de la gravetat

Apareix quan el vehicle es mou en un pla inclinat respecte l'horitzontal, això és, quan puja o baixa una pendent, prenent un valor negatiu quan puja i positiu quan baixa.

$$F_G = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (2.5)$$

On:

- $m$ : es la massa del vehicle (kg).
- $g$ : és la gravetat ( $m/s^2$ ).
- $\alpha$ : pendent del terreny ( $^\circ$ ).

Així doncs, totes les forces que reaccionen sobre un vehicle en marxa s'implementen en diversos blocs, un per cada força descrita, a l'eina Simulink, obtenint com a resultat el sistema que es pot veure a la Figura 2.5.

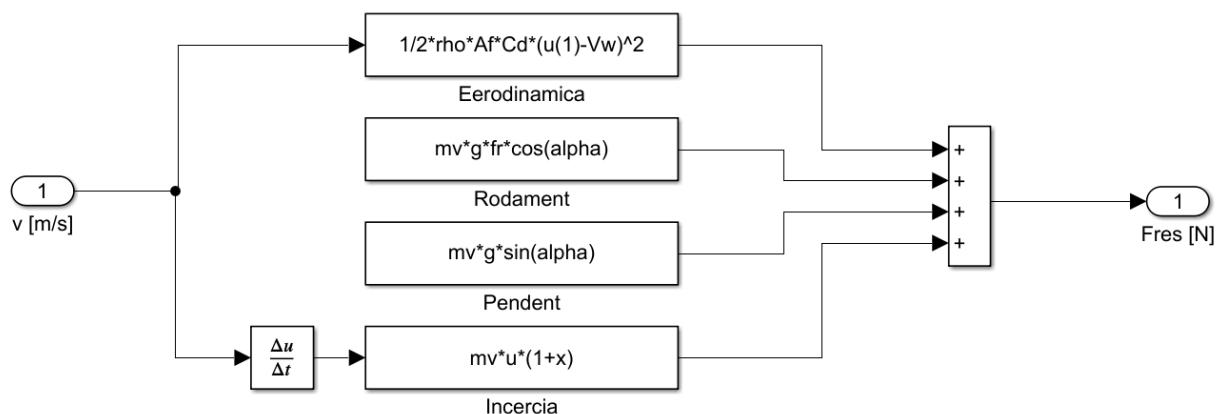


Figura 2.5. Model de les forces que actuen sobre el vehicle. Font: [pròpia].

A la Taula 2.3. es defineixen els valors dels diferents paràmetres utilitzats per calcular el valor total de les forces resistives d'escrietes.

Taula 2.3. Paràmetres de la càrrega del model. Font: [28].

Paràmetre	Valor
Massa del vehicle ( $m_v$ )	800 kg
Coefficient de fricció amb l'aire ( $C_d$ )	0,35
Àrea frontal ( $A_f$ )	2 m <sup>2</sup>
Densitat de l'aire ( $\rho$ )	1,225 kg/m <sup>3</sup>
Constat de la gravetat ( $g$ )	9,8 m/s <sup>2</sup>
Coefficient de rodament ( $f_r$ )	0,02
Inclinació del terreny ( $\alpha$ )	Depèn de l'escenari
Velocitat del vent ( $v_w$ )	Depèn de l'escenari

### 2.2.2. Elements de la cadena principal

En aquest apartat s'exposen els diferents elements constructius del vehicle. Utilitzant la metodologia EMR es modelitza cada part del sistema fent ús de les equacions matemàtiques necessàries definides seguint el model de [29] i, mitjançant la interacció dels diferents blocs, es faran les simulacions pertinents sota unes condicions determinades.

El sistema que simula els elements del vehicle consta de diferents parts tal i com es pot veure a la Figura 2.6, que d'esquerra a dreta són, el convertidor, el motor, la transmissió i el xassís. Cadascuna d'aquestes parts interacciona amb les seves adjacents creant un sistema que bàsicament transforma i transporta una quantitat d'energia en un sentit o en un altre.

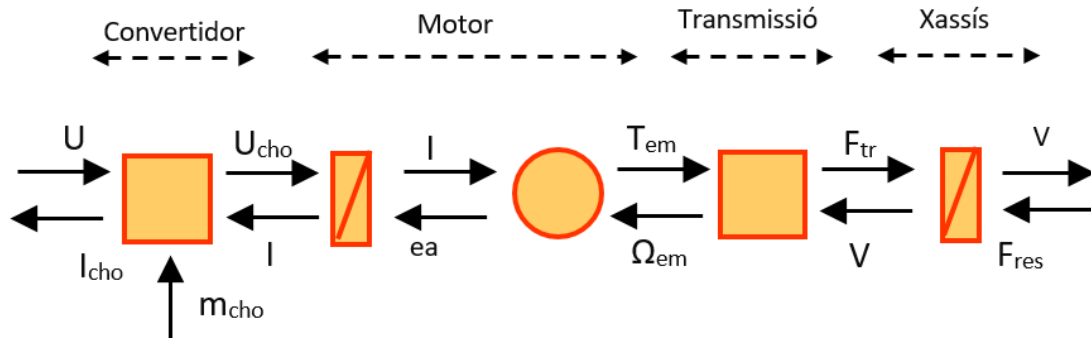


Figura 2.6. Model de la cadena principal d'un vehicle. Font: [pròpia].

## Convertidor

El convertidor és l'encarregat de regular la tensió de sortida segons les expressions que es poden veure a continuació:

$$u_{cho} = m_{cho} \cdot u \quad (2.6)$$

$$i_{cho} = m_{cho} \cdot i \quad (2.7)$$

Aquest bloc modelitza el funcionament d'un convertidor de corrent continu a corrent continu. Depenent d'una senyal d'entrada "m<sub>cho</sub>" provinent del modulador la senyal de sortida tindrà un valor o un altre.

## Motor

La modelització del motor es realitza en dos blocs diferenciats. El primer, corresponent a la part elèctrica del motor, té com a entrades la tensió del convertidor, explicat a l'apartat anterior, i la força contraelectromotriu, una vegada s'han eliminat les pèrdues internes del motor.

Aquest bloc és modelitza seguin el que s'especifica a l'expressió 2.8, que correspon a un model inductiu resistiu sèrie.

$$u_{cho} = R_m \cdot i + L_m \cdot \frac{di}{dt} + e_a \quad (2.8)$$

El corrent de sortida (i) d'aquesta part del motor és la que definirà el parell generat.

En segon lloc es troba el bloc mecànic, el que modelitza la transmissió energètica del motor a l'arbre de transmissió. S'implementa segons les expressions 2.9 i 2.10.

$$T_{em} = k_{vel} \cdot I \quad (2.9)$$

$$e_a = k_{vel} \cdot \omega_{em} \quad (2.10)$$

Com es pot veure a l'expressió 2.9. dependent del corrent de sortida del bloc anterior i d'una constant  $k_{vel}$ , el valor de la qual es defineix mes endavant, el motor donarà un parell determinat a la càrrega. D'altra banda, aquesta mateixa constant és el factor utilitzat per transformar la velocitat angular del motor en força contraelectromotriu a la cadena de reacció, que va en sentit oposat a la cadena d'acció.

### Arbre de transmissió

El parell que dona el motor es transmet a les rodes com a força lineal a través del que s'anomena arbre de transmissió. Això es fa a aplicant un factor de conversió determinat per les característiques de l'arbre, segons l'expressió 2.11. I seguint l'expressió 2.12 el mateix factor de conversió s'aplica per transformar la velocitat lineal a velocitat angular.

$$F_{tr} = T_{em} \cdot \frac{k_{red}}{R_{wh}} \quad (2.11)$$

$$\Omega_{em} = v \cdot \frac{k_{red}}{R_{wh}} \quad (2.12)$$

El factor de conversió  $\frac{k_{red}}{R_{wh}}$  es pot definir com una relació de transmissió interna des del motor fins les rodes.

### Xassís

En el bloc xassís es té en compte l'efecte de la força generada per la massa del propi vehicle. Aquesta força, com s'ha vist a l'apartat de modelització de les forces que actuen sobre el vehicle, es podria implementar en el mateix bloc que les forces generades per les resistències de rodament, aerodinàmica i del pendent. Malgrat això, hi ha una diferència entre aquestes i la que es genera a causa de la massa del vehicle. Aquesta última és una força interna i les altres provenen d'estímul externs, a més cal recordar que les forces i magnituds que tenen una dependència amb el temps es modelitzen, en la metodologia EMR, fent ús d'un element integrador. És per això que s'ha utilitzat aquest bloc.

Així doncs, la força lineal obtinguda de la transmissió del vehicle s'aplica sobre el xassís del vehicle fent que aquest agafi una certa velocitat. Aquest bloc es modelitza amb la següent equació diferencial.

$$m_v \frac{d}{dt} \cdot v = (F_{tr} - F_{res}) \quad (2.13)$$

A la Taula 2.4. es poden veure els valors dels paràmetres utilitzats per a la definició dels diferents blocs del tren principal del vehicle.

Taula 2.4. Paràmetres dels elements de la cadena principal del vehicle. Font: [28].

Paràmetre	Valor
Inductància dels debanats de l'excitació ( $L_m$ )	6,5 mH
Resistència dels debanats de l'excitació ( $R_m$ )	0,35 $\Omega$
Constant de la velocitat ( $k_{vel}$ )	1,2396 V·s/rad
Rati de reducció a la caixa d'engranatges ( $k_{red}$ )	5
Radi de la roda ( $R_{wh}$ )	0,26 m

### 2.2.3. Alimentació

En aquest apart es defineixen els models de les fonts que alimenten el sistema estudiat, en aquest cas, la bateria i la pila de combustible d'hidrogen. A la Figura 2.7. es pot veure el sistema des de les fonts d'alimentació fins al bloc d'acoblament d'aquestes amb la cadena principal del vehicle híbrid.

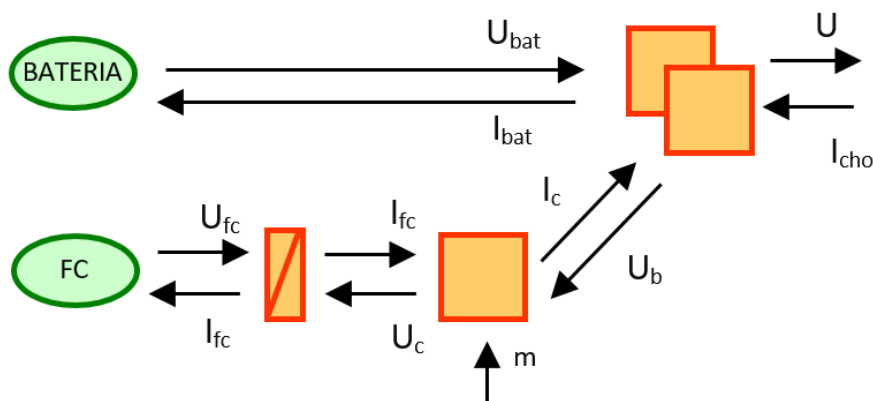


Figura 2.7. Model de l'alimentació d'un vehicle híbrid amb pila de combustible d'hidrogen i bateries.  
Font: [pròpia].

#### 2.2.3.1. Bateria

Amb l'ús cada vegada més estès de les bateries al món actual l'eina de simulació s'ha tornat indispensable. D'aquesta manera es poden caracteritzar bateries, estimar l'estat de càrrega i l'estat de salut i optimitzar els sistemes que fan ús d'aquests elements sense costos molt elevats, simplement utilitzant el programari requerit

Existeixen tres tipologies de models de bateries, l'experimental i l'electroquímica, que en la majoria dels casos no serveixen per a modelitzar el comportament elèctric de la bateria, i els models basats en circuits equivalents. Aquests últims permeten representar i estudiar les característiques elèctriques de diferents tipologies de bateries.

En aquest cas doncs, s'implementarà un model basat en un circuit equivalent al d'una bateria. Concretament, el model es basa en la connexió d'una font de tensió en sèrie amb una resistència interna com es pot veure a la figura 2.8.

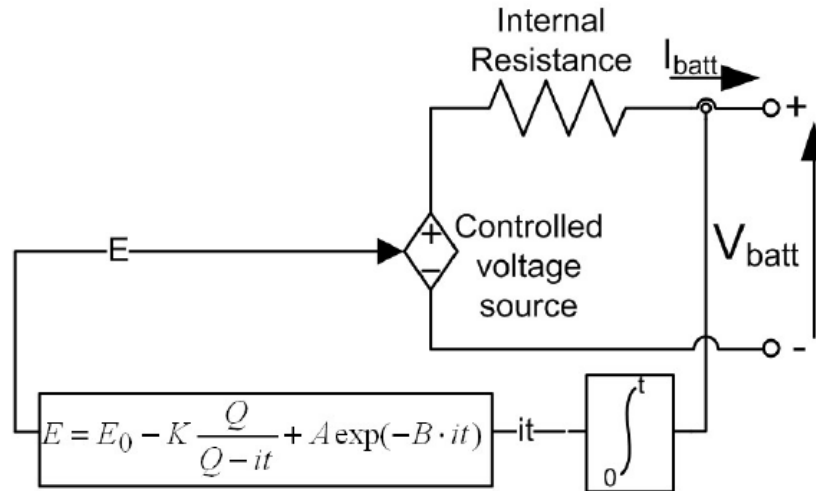


Figura 2.8. Model de circuit equivalent de la bateria. Font: [30].

Les expressions que defineixen el comportament de la font de tensió i de la bateria tenint en compte la resistència en sèrie són les equacions 2.14. i 2.15.

$$E = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - \int idt} + A \cdot e^{-B \cdot \int idt} \quad (2.14)$$

$$U_{bat} = E - R \cdot i \quad (2.15)$$

On:

- E: tensió sense càrrega (V).
- E<sub>0</sub>: tensió constant (V).
- K: tensió de polarització (V).
- Q: capacitat (Ah).
- $\int idt$ : càrrega instantània (Ah).
- A: cdt de la zona exponencial (V).
- B: constant de temps inversa de la zona exponencial (Ah<sup>-1</sup>).
- U<sub>bat</sub>: tensió (V).
- R: resistència interna (Ω).
- I: corrent (A).

Per implementar el model de la bateria es fan algunes suposicions amb la finalitat de simplificar-lo. Entre altres, aquestes suposicions són:

- El valor de la resistència no varia durant els períodes de càrrega i descàrrega ni amb l'amplitud del corrent.
- Els valors dels paràmetres que defineixen el comportament de la bateria són els mateixos tant pel cicle de càrrega com pel de descàrrega.
- La capacitat de la bateria no varia amb l'amplitud del corrent
- La temperatura no afecta al model.

A més, se suposa que l'efecte d'auto descàrrega de la bateria és nul, tot i que en aquest cas té poca importància ja que en un vehicle no es donen llargs períodes en els que no s'utilitza la bateria, i en el cas que es donessin, no suposarien grans pèrdues energètiques.

D'altra banda, i pel correcte funcionament del model, s'han de tenir en compte una sèrie de limitacions que en marquen el comportament. En primer lloc, la tensió mínima sense càrrega de la bateria té un valor igual a 0 V i la màxima no té límit. I en segon lloc, la capacitat mínima de la bateria és igual a 0 Ah i la màxima, igual que pel cas de la tensió, no està limitada. En conseqüència, en aquest model, el SOC màxim podria arribar a superar el valor del 100 %.

Per a la implementació del model en Matlab, primerament cal definir els valors dels paràmetres. Això es fa, segons [30], a partir dels paràmetres determinats a les corbes de descàrrega dels fabricants.

La resistència interna es pot obtenir a partir de l'expressió 2.16 i els valors del full de característiques de la bateria.

$$R = V_{nom} \cdot \frac{1 - \eta}{0,2 \cdot Q_{nom}} \quad (2.16)$$

On:

- $V_{nom}$ : tensió nominal (V).
- $Q_{nom}$ : capacitat nominal (Ah).
- $\eta$ : rendiment (99,5 %, per una cel·la d'1,2 V)

La caiguda de tensió a la zona exponencial es pot calcular com:

$$A = E_{full} - E_{exp} \quad (2.17)$$

On:

- $E_{full}$ : tensió amb càrrega completa (V).
- $E_{exp}$ : tensió al final de la zona de descàrrega exponencial (V).

En tercer lloc, es calcula la constant de temps inversa de la zona exponencial fent ús de l'expressió 2.18.

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (2.18)$$

I en última instància es determinen els valors de la tensió de polarització i de la tensió constant:

$$K = \frac{E_{full} - E_{nom} + A(e^{(-B \cdot Q_{nom})-1} \cdot Q - Q_{nom})}{Q_{nom}} \quad (2.19)$$

$$E_0 = E_{full} + K + R \cdot i - A \quad (2.20)$$

On:

- $E_{nom}$ : tensió al final de la zona nominal (V).

Tots els valors emprats a les expressions descrites es poden obtenir del full de característiques del fabricant, a partir de la corba de descàrrega. En aquest cas, es calculen amb els valors de la Figura 2.9. adjunta a continuació.

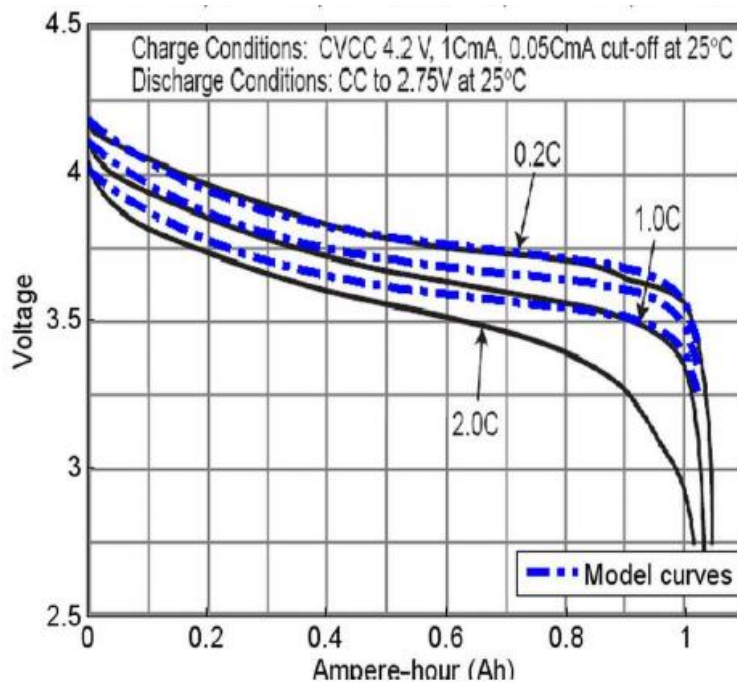


Figura 2.9. Corba de descàrrega d'una bateria Li-Io. Font: [30].



A la Taula 2.5. es poden veure els valors dels paràmetres de la bateria modelitzada.

Taula 2.5. Paràmetres del model d'una bateria lo-Li. Font: [30]

Paràmetres	Valor
Capacitat (Q)	1(Ah)
Tensió constant (E <sub>0</sub> )	3,7348 (V)
Resistència interna (R)	0,09 (Ω)
Tensió de polarització (K)	0,00876 (V)
Caiguda de tensió de la zona exponencial (A)	0,468 (V)
Constant de temps inversa de la zona exponencial (B)	3,5294 (Ah) <sup>-1</sup>

Cal remarcar que per a la implementació del model tots els paràmetres s'han de definir en les unitats del sistema internacional, en aquest cas això afecta a Q i a B:

$$C = 1 \text{ Ah} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 3600 \text{ As} \tag{2.21}$$

$$B = 3,5294 \text{ Ah}^{-1} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 0,00098 \text{ As}^{-1} \tag{2.22}$$

El model implementat al programari Simulink es pot veure a la figura 2.10:

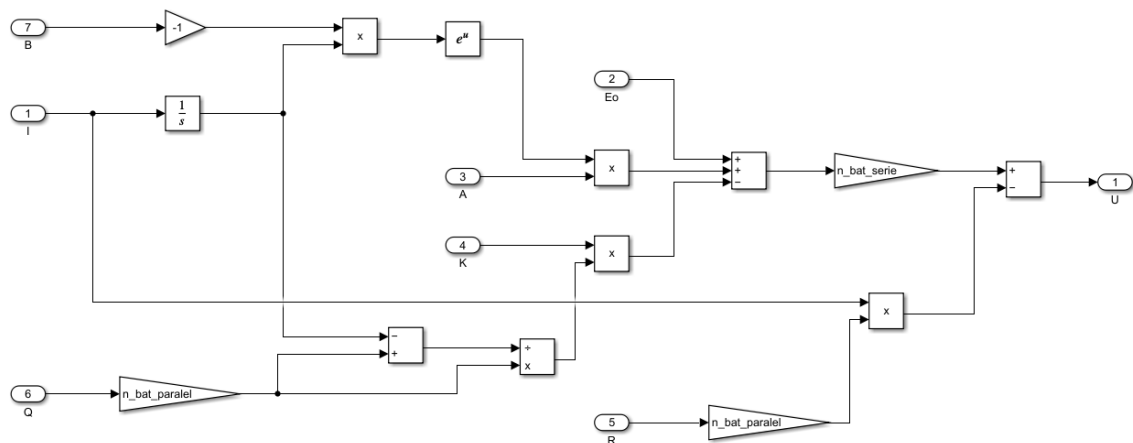


Figura 2.10. Model de bateria implementat en Simulink. Font: [pròpia].

Tot seguit, i per validar el model de la bateria exposat a la figura anterior, es mostren les corbes de descàrrega per a corrents amb diferents valors a les figures 2.11., 2.12. i 2.13.

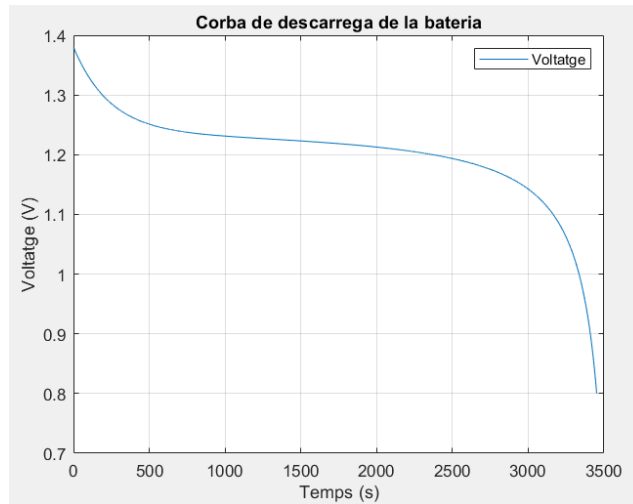


Figura 2.11. Corba de descàrrega de la bateria amb un corrent de 6,5 A. Font: [pròpia].

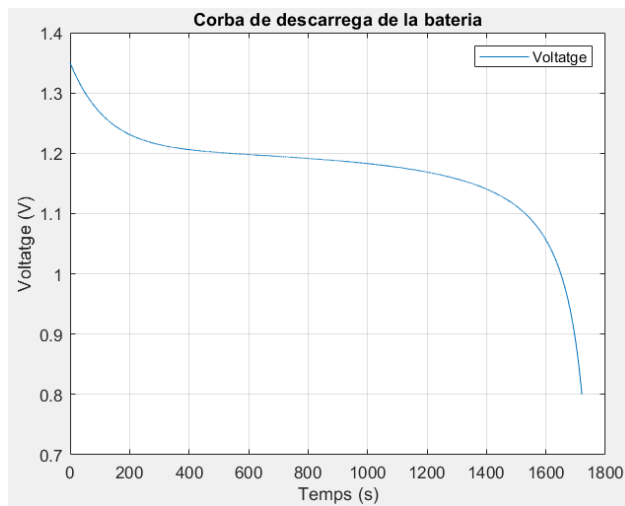


Figura 2.12. Corba de descàrrega de la bateria amb un corrent de 13 A. Font: [pròpia].

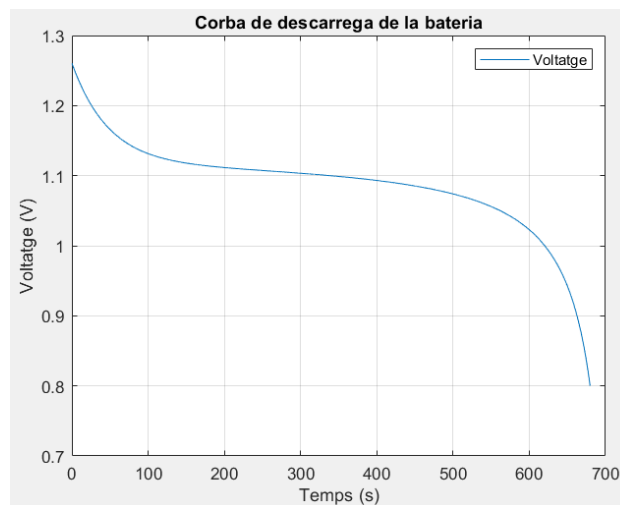


Figura 2.13. Corba de descàrrega de la bateria amb un corrent de 32,5 A. Font: [pròpia].

A la Figura 2.14 es mostren les corbes de descàrrega en les mateixes característiques que pel cas de les figures anteriors i es pot comprovar com els resultats del model s'aproximen molt als determinats pel fabricant al full de característiques de la bateria, validant el model.

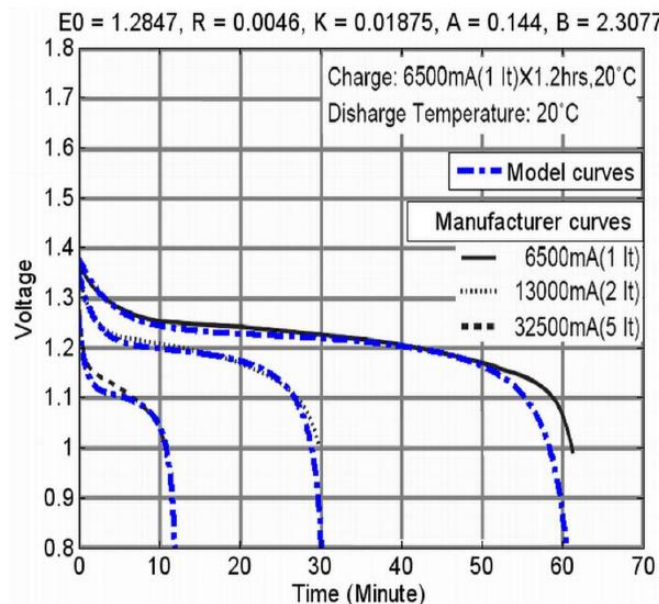


Figura 2.14. Corbes de descàrrega pels corrents de 6,5 A, 13 A i 32,5 A. Font: [30]

### 2.2.3.2. Pila de combustible

Per estudiar el comportament energètic d'una pila de combustible, igual que en el cas de les bateries, i per evitar haver de disposar físicament de la pila per extreure'n dades experimentalment, s'implementa un model matemàtic.

A la literatura hi ha recollits molts models diferents d'aquests tipus de dispositius, els quals es poden dividir en tres categories, els models químics, els experimentals i els elèctrics. En aquest cas s'implementarà un model elèctric d'una pila de combustible ja que els altres dos no es podrien implementar fàcilment en el sistema modelitzat i no donarien dades tant precises del comportament elèctric de l'element.

Concretament, el model implementat representa la pila de combustible mitjançant la connexió en sèrie d'una font controlada de tensió i d'una resistència constata tal i com es pot veure a la Figura 2.15.

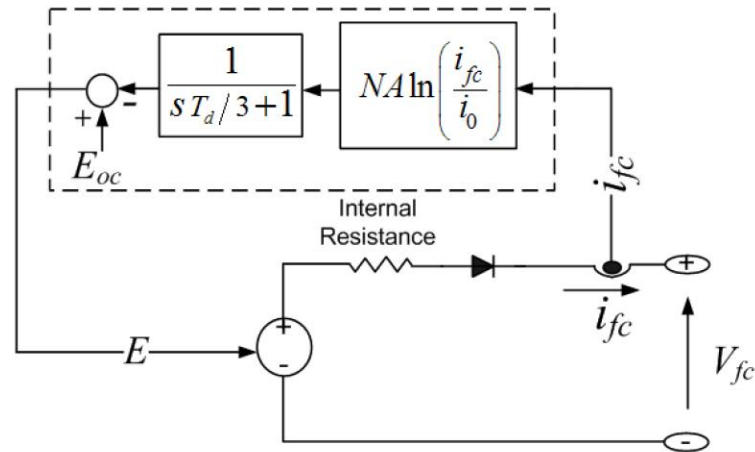


Figura 2.15. Model de circuit equivalent de la pila de combustible. Font: [31].

Així doncs, el voltatge generat per la pila de combustible es modelitza tal i com s'especifica a les expressió 2.23 i 2.24 [31]:

$$E = E_{oc} - N \cdot A \cdot \ln\left(\frac{i_{fc}}{i_o}\right) \cdot \frac{1}{s \cdot \frac{T_d}{3} + 1} \quad (2.23)$$

$$V_{fc} = E - R_{ohm} \cdot i_{fc} \quad (2.24)$$

On:

- $E$ : tensió de la fot de tensió controlada (V).
- $E_{oc}$ : tensió de circuit obert (V).
- $N$ : nombre de cel·les.
- $A$ : pendent de Tafel (V).
- $i_o$ : corrent d'intercanvi (A).
- $T_d$ : temps de resposta al 95% del valor final (s).
- $R_{ohm}$ : resistència interna ( $\Omega$ ).
- $i_{fc}$ : corrent de la pila de combustible (A).
- $V_{fc}$ : voltatge de la pila de combustible (V).

En aquest model es tenen en compte les pèrdues d'activació, generades per les reaccions químiques als elèctrodes, introduint un enrederiment amb la funció de transferència de primer ordre que es pot veure a l'expressió 2.23. Les pèrdues causades per la resistència dels elèctrodes i l'electròlit es contempen introduint el valor de  $R_{ohm}$ .

Aquest model es pot utilitzar per simular el comportament d'una pila de combustible tenint en compte que treballi a condicions nominals de pressió i temperatura. En el cas que es

vulgui considerar altres condicions de treball, s'hauria d'implementar un model més detallat i complet, tot i que per l'estudi que ocupa aquest projecte no s'ha considerat necessari.

Per a la implementació del present model els paràmetres necessaris es poden extreure dels fulls de característiques dels fabricants. Aquests són la tensió de circuit obert ( $E_{oc}$ ), el corrent d'intercanvi ( $i_o$ ), el nombre de cel·les ( $N$ ) i el pendent de Tafel ( $A$ ) i el valor de la resistència interna ( $R_{ohm}$ ). D'altra banda, es determinen els altres paràmetres necessaris mitjançant aproximacions, calculades a partir de les expressions 2.25, 2.26 i 2.27.

$$V_1 = E_{oc} - N \cdot A \cdot \ln(i_o) - R_{ohm} \quad (2.25)$$

$$V_{nom} = E_{oc} - N \cdot A \cdot \ln\left(\frac{I_{nom}}{i_o}\right) - R_{ohm} \cdot I_{nom} \quad (2.26)$$

$$V_{min} = E_{oc} - N \cdot A \cdot \ln\left(\frac{I_{max}}{i_o}\right) - R_{ohm} \cdot I_{max} \quad (2.27)$$

A partir de les quals:

$$N \cdot A = \frac{(V_1 - V_{nom}) \cdot (I_{max} - 1) - (V_1 - V_{min}) \cdot (I_{nom} - 1)}{\ln(I_{nom}) \cdot (I_{max} - 1) - \ln(I_{max}) \cdot (I_{nom} - 1)} \quad (2.28)$$

$$R_{ohm} = \frac{V_1 - V_{nom} - N \cdot A \cdot \ln(I_{nom})}{I_{nom} - 1} \quad (2.29)$$

$$i_o = \exp\left(\frac{V_1 - E_{oc} + R_{ohm}}{N \cdot A}\right) \quad (2.30)$$

Els valors utilitzats a les expressions exposades es poden obtenir del full de característiques tècniques del fabricant i dels gràfics facilitats per aquest. A la Figura 2.16. es pot veure una corba de polarització típica a partir de la que s'aconsegueixen alguns dels valors necessaris per a la modelització:

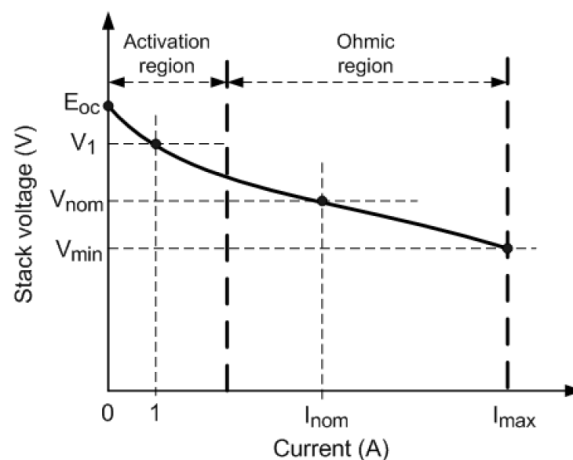


Figura 2.16. Corba de polarització típica d'una pila de combustible. Font: [31].

En aquest cas es modelitza la pila de combustible 6kW-45 V, PEMFC del fabricant NedStack, que en condicions nominals:

Taula 2.6. Paràmetres d'operació de la pila PEMFC del fabricant NedStack. Font: [31]

Voltatge nominal a 0 A i 1 A [ $E_{oc}$ , $V_1$ ]	[65, 63]
Punt d'operació nominal [ $I_{nom}$ , $V_{nom}$ ]	[133.3, 45]
Punt d'operació al màxim [ $I_{max}$ , $V_{min}$ ]	[225, 37]

Així doncs, a partir de les expressions 2.28, 2.29 i 2.30 i els valors de la Taula 2.6. es calculen els paràmetres necessaris per a la modelització de la pila de combustible.

$$N \cdot A = \frac{(63 - 45) \cdot (225 - 1) - (63 - 37) \cdot (133.3 - 1)}{\ln(133.3) \cdot (225 - 1) - \ln(225) \cdot (133.3 - 1)} = 1,5609 \text{ V} \quad (2.31)$$

$$R_{ohm} = \frac{63 - 45 - 1,5609 \cdot \ln(133.3)}{133.3 - 1} = 0,07833 \text{ } \Omega \quad (2.32)$$

$$i_o = \exp\left(\frac{63 - 65 + 0,07833}{1,5609}\right) = 0,29197 \text{ A} \quad (2.33)$$

El model implementat al programari Simulink es pot veure a la figura 2.17:

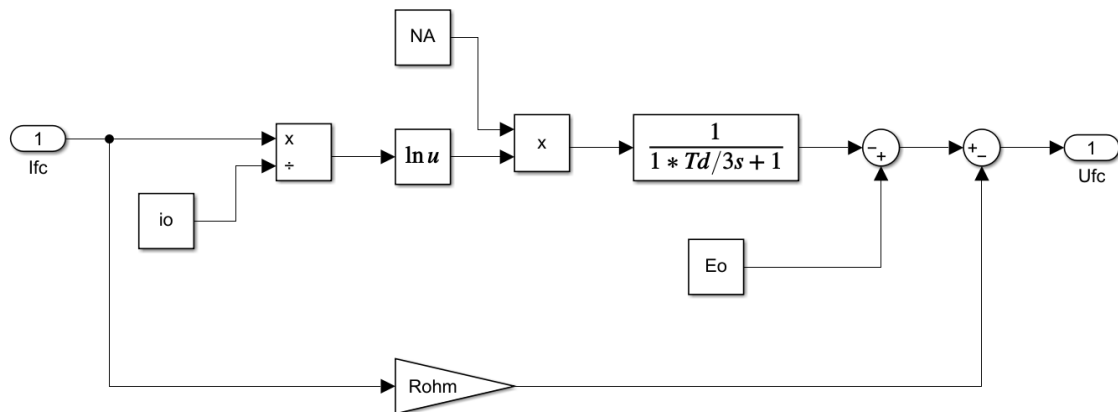


Figura 2.17. Model de la pila de combustible implementat en Simulink. Font: [pròpia].

A continuació, de la mateixa manera que s'ha fet en el cas de la bateria, es procedeix a validar el model implementat. Això es farà graficant el corrent i el voltatge de la pila.

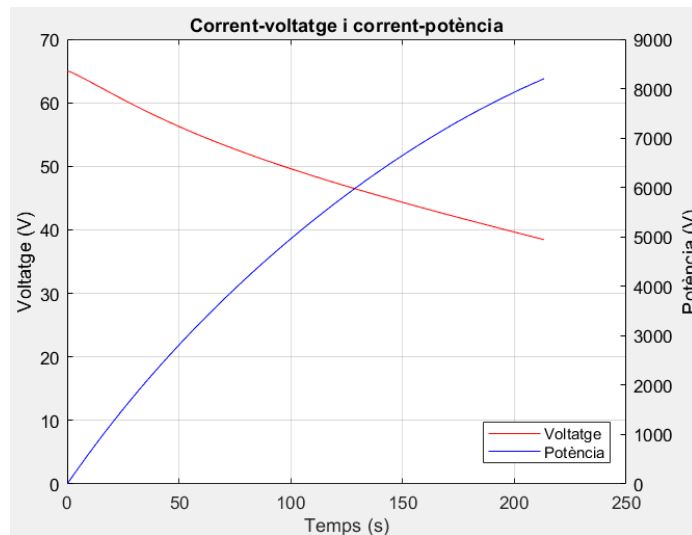


Figura 2.18. Corba de comprovació corrent-voltatge i corrent-potència del model implementat.

Font: [pròpia].

A partir de la comparació entre les Figures 2.18 i 2.19 es pot comprovar el correcte funcionament del model de la pila de combustible.

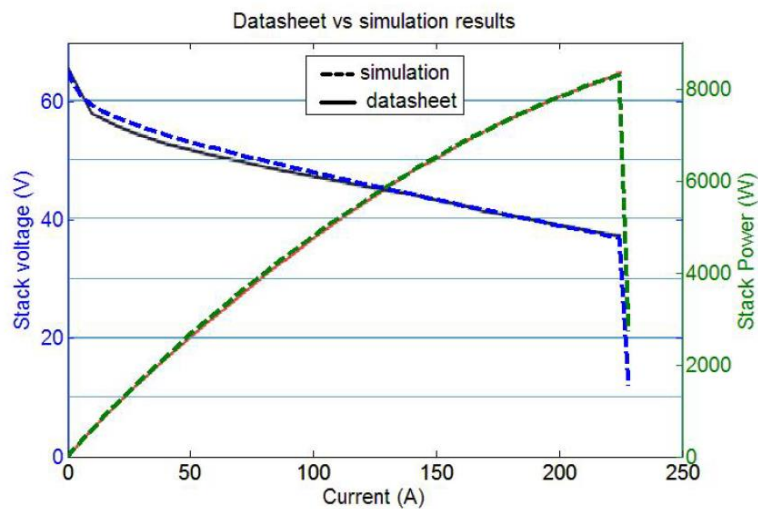


Figura 2.19. Corba de comprovació corrent-voltatge i corrent-potència del fabricant. Font: [31].

### 2.2.3.3. Hibridació

Com es pot veure a la Figura 2.20, amb la finalitat de combinar l'energia provinent de les dues fonts, s'implementen diferents blocs.

A la metodologia EMR existeixen les associacions passives i actives. Les primeres, les associacions passives, consisteixen en l'acoblament directe entre les dos fonts energètiques, sense incorporar elements d'electrònica de potència entre aquestes. Com a

avantatge principal, aquesta opció és més simple que la seva alternativa, no obstant no permet distribuir l'energia de manera òptima. El segon tipus d'associació, l'associació activa, consisteix en implementar un convertidor per una de les fonts o les dues, això és, implementar un convertidor a la bateria, a la pila de combustible o als dos elements. L'objectiu d'aquesta metodologia és tenir un control en el flux de potència entre les dues fonts [32].

En aquest cas la hibridació consisteix en la unió d'un banc de bateries connectat directament a un bloc d'acoblament i en la pila de combustible connectada a l'esmentat bloc inductor més convertidor.

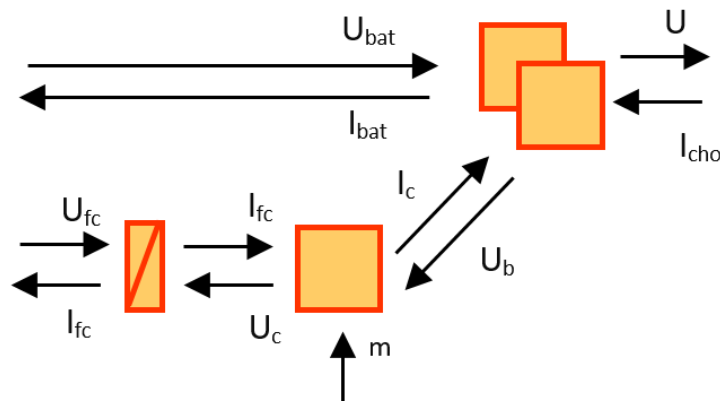


Figura 2.20. Model de la hibridació d'un vehicle híbrid amb pila de combustible d'hidrogen i bateries. Font: [pròpia].

La dinàmica del corrent de l'inductor es modela tal i com s'ha fet amb la part elèctrica del motor, mitjançant un circuit RL determinat segons l'expressió adjunta a continuació.

$$u_c = R_{fc} \cdot i_{fc} + L_{fc} \cdot \frac{d}{dt} i_{fc} + u_{fc} \quad (2.34)$$

Pel convertidor es fa ús d'un model general definit per les equacions 2.35 i 2.36. Aquest model permet exercir control sobre la potència alliberada al sistema per la pila de combustible

$$u_c = m \cdot u_b \quad (2.35)$$

$$i_c = m \cdot i_{fc} \quad (2.36)$$

D'altra banda, l'element d'acoblament modelitza un node on es segueixen les lleis de Kirchoff definides segons:

$$i_{cho} - i_c = i_{bat} \quad (2.37)$$

$$u_{bat} = u_b = u \quad (2.38)$$



És important entendre que tot el sistema de tracció i el seu control es representen com una font de corrent. Aquest sistema imposa el corrent necessari segons l'energia demandada en cada moment ( $i_{cho}$ ) per tal que la càrrega assoleixi una velocitat determinada. Les fonts d'alimentació del vehicle es modelitzen com dues fonts de tensió.

A la Taula 2.7. es poden veure els valors dels paràmetres utilitzats per a la definició dels diferents blocs de la pila de combustible.

Taula 2.7. Paràmetres dels elements de la cadena de la pila de combustible. Font: [28].

Paràmetre	Valor
Inductància ( $L_{fc}$ )	1 mH
Resistència ( $R_{fc}$ )	0,05 $\Omega$

#### 2.2.4. Control

El control servirà per aconseguir que la velocitat a la que es mou el vehicle, segons els resultats de les simulacions, sigui el més propera a una velocitat de referència marcada. És important el temps que es tarda en assolir aquesta velocitat, ja que en un vehicle real el sistema ha de poder adaptar-se ràpidament a canvis bruscs. A les Figures 2.21 i 2.22 es mostren les dues cadenes de control de les que consta el sistema modelitzat.

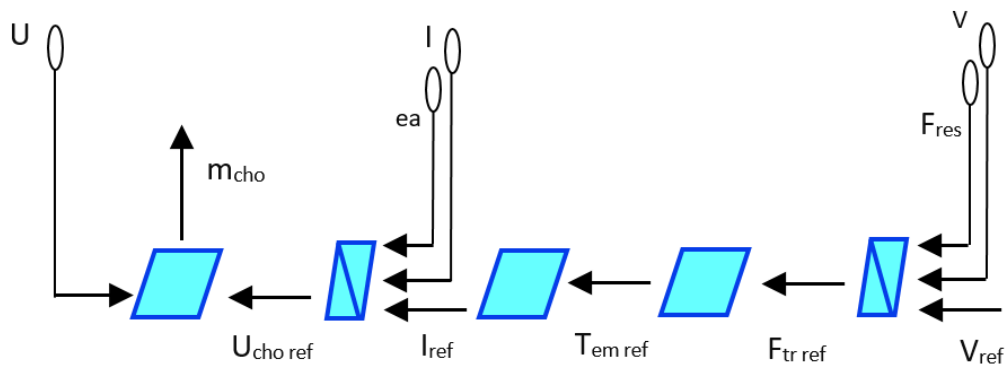


Figura 2.21. Model del control de la cadena principal del vehicle híbrid amb pila de combustible d'hidrogen i bateries. Font: [pròpia].

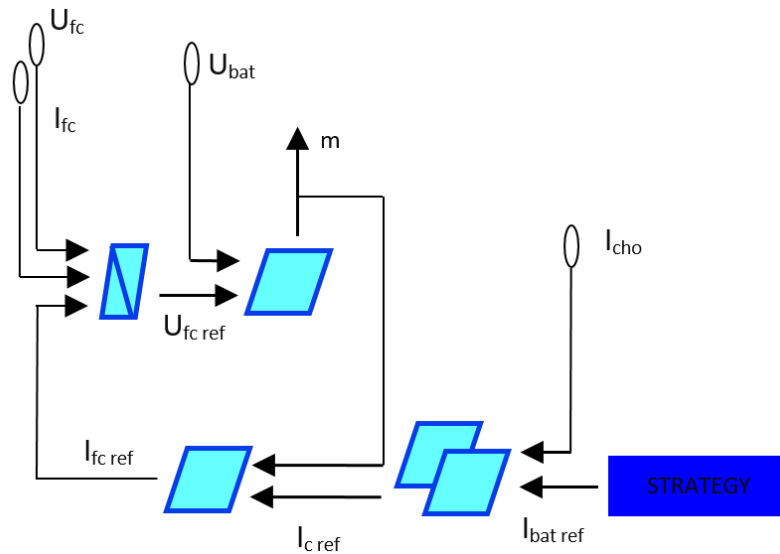


Figura 2.22. Model del control de la pila de combustible del vehicle híbrid amb pila de combustible d'hidrogen i bateries. Font: [pròpia].

La metodologia de control emprada en aquest cas consisteix en la inversió bloc a bloc de la cadena principal del vehicle, tenint en compte si el model intern del bloc depèn o no del temps, això és, si el bloc és del tipus acumulador o convertidor.

Així doncs, existiran dos tipologies de blocs de control, aquells en els que no hi ha dependència amb el temps, que es podran invertir directament de manera que el model dins aquests blocs serà l'invers del seu homòleg. I els blocs acumuladors, que no es podran invertir directament i per això s'haurà de realitzar el control fent ús de llaços integradors.

Pel cas modelitzat s'implementen tres llaços de control del segon tipus, dos per a la cadena principal i un per la cadena de la pila de combustible. Els esquemes d'aquests blocs de control es poden observar a les Figures 2.23, 2.24 i 2.25.

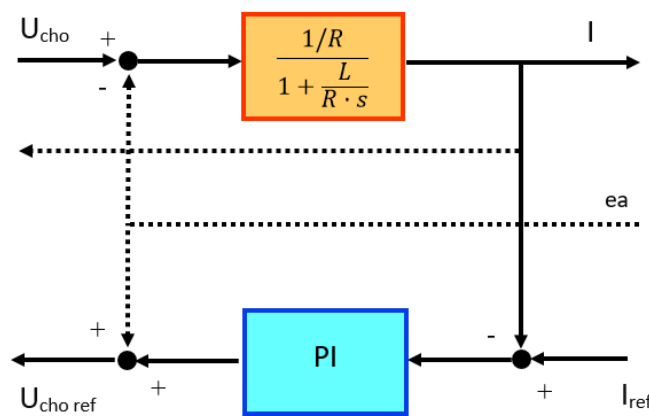


Figura 2.23. Controlador del motor, llaç de corrent. Font: [pròpia].

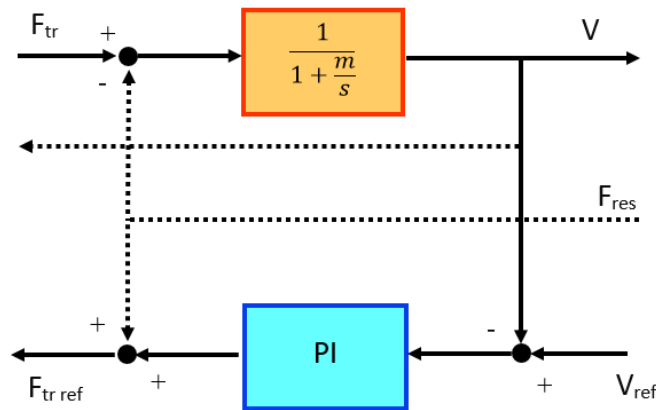


Figura 2.24. Controlador del vehicle, llaç de velocitat. Font: [pròpia].

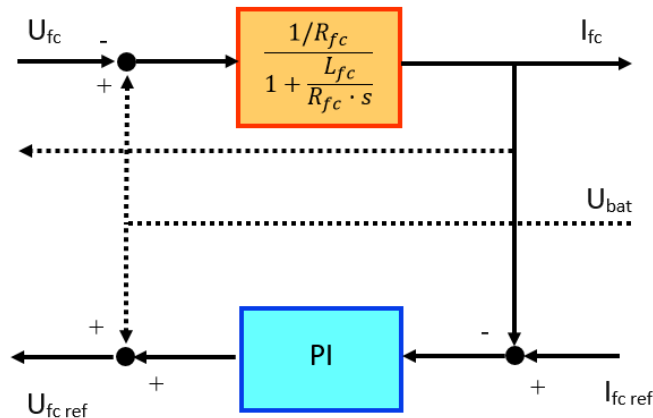


Figura 2.25. Controlador de la pila de combustible, llaç de corrent. Font: [pròpia].

En els tres casos les especificacions del control es fixen sobre l'error, que s'ha de minimitzar el més ràpidament possible sense perdre l'estabilitat del sistema. Per aconseguir un error nul, això és, que la diferència entre la referència i el valor mesurat del sistema sigui nul·la, i per augmentar el sistema faran falta controladors tipus PI, que són preferibles als PD per tal d'evitar problemes de soroll [33].

Els controladors de la cadena principal formen dos llaços tancats de control. El primer, el llaç intern, correspon al control de corrent, i el segon, el llaç extern, al de la velocitat. Cal tenir en compte que per tal que la resposta del sistema sigui estable i s'aconsegueixi assolir la velocitat de referència en poc temps, el llaç intern haurà de ser més ràpid que l'extern.

Els senyals de sortida dels dos controladors de corrent (anomenats a les Figures 2.21 i 2.22 amb els noms de "U\_cho\_ref" i "U\_fc\_ref" respectivament) aniran als blocs moduladors en els quals, a partir de la comparació d'aquests amb les tensions corresponents (U i U\_bat respectivament), es controlarà els convertidors de la cadena principal i de la cadena de la pila de combustible, regulant la potència de sortida. Això es podria haver fet introduint un

modulador PWM o qualsevol altra estratègia de modulació més precisa, no obstant, no es objectiu del present projecte aprofundir en els en cadascun dels blocs del vehicle, sinó fer un anàlisi general.

Per acabar amb el disseny i implementació dels controladors, s'han de definir els paràmetres que en marcaran la dinàmica. Això es realitza fent ús de les equacions exposades a continuació [34]:

$$\alpha = \frac{\ln 9}{t_r} \quad (2.39)$$

$$k_p = P_1 \cdot \alpha \quad (2.40)$$

$$k_i = P_2 \cdot \alpha \quad (2.41)$$

$$C(s) = k_p \left( 1 + \frac{k_i}{k_p \cdot s} \right) \quad (2.42)$$

On:

- $t_r$ : temps d'establiment
- $k_p$ : constant proporcional
- $k_i$ : constant integral

Es pot veure doncs, que els controladors seran del tipus PI, proporcionals i integrals. Els paràmetres dels diferents llaços queden definits segons els paràmetres establerts a la Taula 2.8:

Taula 2.8. Paràmetres del control. Font: [pròpia].

Controlador	$t_r$ (s)	$\alpha$	$k_p$	$k_i$
Llaç de velocitat del motor	0.01	219,72	$1,76 \cdot 10^5$	0
Llaç de corrent del motor	$5 \cdot 10^{-3}$	439,44	2,86	153,81
Llaç de corrent de la pila de combustible	$5 \cdot 10^{-3}$	439,44	0,44	21,97

Cal fer esment de la problemàtica trobada en el cas del control del llaç de de la pila de combustible. Com que es requereixen mesures per completar el llaç de control es poden donar certs errors, no obstant això es solucionen fent ús de metodologies simples segons [35]. Concretament, amb aquesta metodologia de control d'inversió (IBC, *inversion based control*) per tal d'obtenir la magnitud "m" es requereix un valor inicial d'aquesta mateixa mesura, sinó el programa donarà error. Per evitar aquest error s'ha decidit introduir un cert

enrederament en el llaç de control, implementat en el llaç tancat de  $I_{fc}$ . Per això s'ha introduït el bloc *memory*.

### 2.2.5. Strategy

L'últim bloc a determinar per acabar la implementació del model del vehicle híbrid és el bloc *strategy*.

Com que l'element d'acoblament s'ha modelitzat com un node de corrents on les tensions mantenen el seu valor, per tal de controlar i repartir el flux de potència entre les dues fonts s'haurà d'imposar un corrent de referència determinat, d'això s'encarrega el bloc *strategy*, que, en aquest cas, defineix el corrent de referència de la bateria ( $I_{bat\ ref}$ )

Amb aquesta estratègia es determina la contribució energètica de les bateries en comparació a la contribució de la pila de combustible. En aquest cas, es decideix que la pila de combustible generi potència de la manera més continua possible, fent ús de les bateries per suplir els possibles pics de potència que es puguin donar.

## 2.3. Simulacions

Per analitzar el funcionament del model explicat en els apartats anteriors, s'exposaran i comentaran els resultats obtinguts.

S'ha considerat interessant analitzar, a més del model del vehicle híbrid, el resultat pel model de la càrrega, que simula les forces sobre un vehicle en marxa i els resultats obtinguts del model elèctric del vehicle abans de fer la hibridació, per tant els resultats d'un vehicle elèctric pur alimentat amb bateries.

Aquestes simulacions s'han extret dels models implementats en Matlab i Simulink, els quals s'han sotmès a diferents escenaris de velocitat, acceleració i pendent.

### 2.3.1. Resultats de la càrrega

A la Taula 2.9 es poden veure els valors de força, potència i energia corresponents a les components de la força resistiva d'un vehicle amb les característiques que es comenten a l'apartat 2.2.1 d'aquest document.

S'ha plantejat l'escenari d'un vehicle anant a una velocitat constant de 60 km/h durant 60 segons (el temps únicament és important en el cas del càlcul de l'energia). Es pot apreciar com, tant la força resistiva generada per la gravetat com per la inèrcia tenen valors nuls. En el cas de la component de la gravetat ( $F_g$ ) val zero ja que no hi ha pendent i pel que fa a la component de la inèrcia té un valor nul ja que no hi ha acceleració.

Taula 2.9. Components de la càrrega a 60 km/h durant 60 segons, valors màxims. Font: [pròpia].

Component	F (N)	P (kW)	E (kWh)
Resistència aerodinàmica ( $F_w$ )	119,1	2	$1,60 \cdot 10^{-2}$
Resistència del rodament ( $F_r$ )	157	2,62	$2,04 \cdot 10^{-2}$
Resistència de la gravetat ( $F_g$ )	0	0	0
Resistència de la inèrcia ( $F_i$ )	0	0	0

A la Taula 2.10 es pot veure la influència que té el fet d'incloure components d'inclinació en el terreny i d'acceleració. Les forces d'aquests components són molt significatives.

Taula 2.10. Components de la càrrega amb una acceleració de 0 a 60 km/h en 30 segons amb un pendent del 10%, valors màxims. Font: [pròpia].

Component	F (N)	P (kW)	E (kWh)
Resistència aerodinàmica ( $F_w$ )	119,1	2	$4,14 \cdot 10^{-3}$
Resistència del rodament ( $F_r$ )	157	2,62	$1,09 \cdot 10^{-2}$
Resistència de la gravetat ( $F_g$ )	780,9	13,02	$5,42 \cdot 10^{-2}$
Resistència de la inèrcia ( $F_i$ )	444,4	7,41	$3,09 \cdot 10^{-2}$

A la Taula 2.11 s'exposen els resultats per una velocitat constant de 60 km/h amb un pendent del 26%. La potència de resistència a la gravetat val 32,91 kW, la potència màxima que pot lliurar el motor del vehicle. Als següents apartats es comprovarà com el pendent límit que pot superar el cotxe és el del 26% d'inclinació

Taula 2.11. Components de la càrrega amb una velocitat de 60 km/h amb un pendent del 26%, valors màxims. Font: [pròpia].

Component	F (N)	P (kW)	E (kWh)
Resistència aerodinàmica ( $F_w$ )	119,1	2	$1,60 \cdot 10^{-2}$
Resistència del rodament ( $F_r$ )	157	2,62	$2,04 \cdot 10^{-2}$
Resistència de la gravetat ( $F_g$ )	1.975	32,91	0,27
Resistència de la inèrcia ( $F_i$ )	0	0	0

A la Figura 2.26 s'aprecia com la component resistiva generada per l'aerodinàmica augmenta amb el quadrat de la velocitat. Malgrat això, el seu valor final és el mateix que en el cas anterior ja que la velocitat, al final del període d'acceleració, és de 60 km/h. També s'exposa en aquesta imatge el total de les forces resistives.

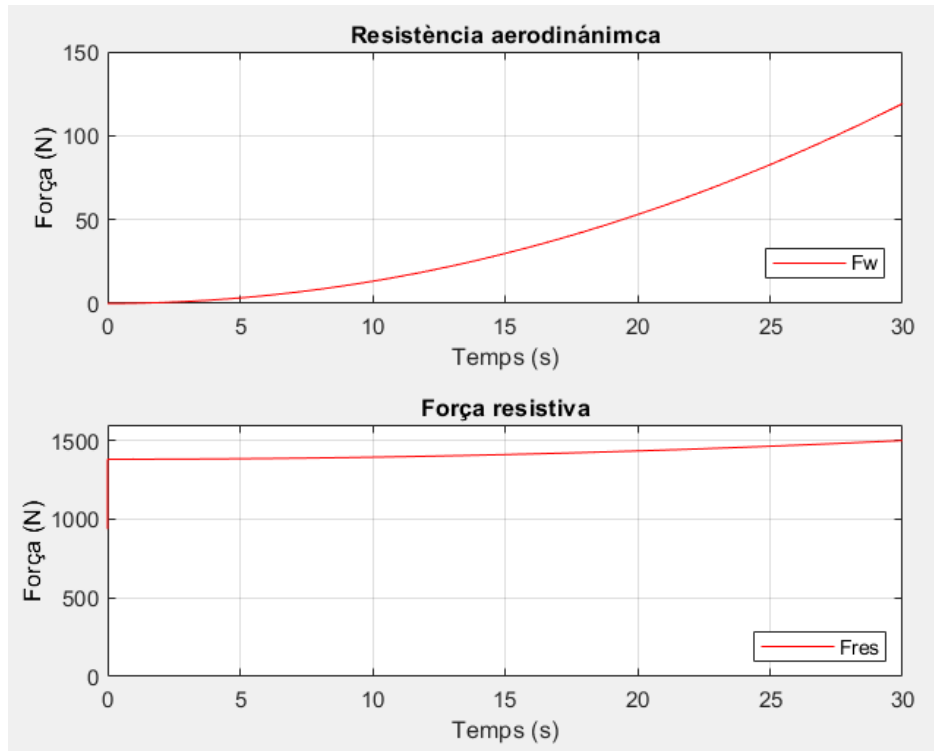


Figura 2.26. Resistència aerodinàmica i força resistiva de la càrrega amb una acceleració de 0 a 60 km/h en 30 segons amb un pendent del 10%. Font: [pròpia].

En aquest cas es simula el perfil de velocitats WLTP classe 3. Per aquest cicle el pendent és 0 i per això tant la resistència al rodament com la resistència generada a causa de la gravetat tenen valors constants. En el cas de la segona el valor és constant i nul. A la Taula 2.12 es s'exposen els valors més característics de la simulació.

Taula 2.12. Components de la càrrega seguint el perfil WLTP classe 3, valors màxims.  
Font: [pròpia].

Component	F (N)	P (kW)	E (kWh)
Resistència aerodinàmica ( $F_w$ )	570,4	20,77	$1,47 \cdot 10^{-2}$
Resistència del rodament ( $F_r$ )	157	5,72	$2,51 \cdot 10^{-3}$
Resistència de la gravetat ( $F_g$ )	0	0	0
Resistència de la inèrcia ( $F_i$ )	1.366	17,01	$1,57 \cdot 10^{-1}$

A la Figura 2.27 es pot veure com la força resistiva que més caracteritza el comportament del vehicle és la de la pròpia inèrcia a més del de la gravetat, que en aquest cas és constant i nul·la ja que el pendent és zero.

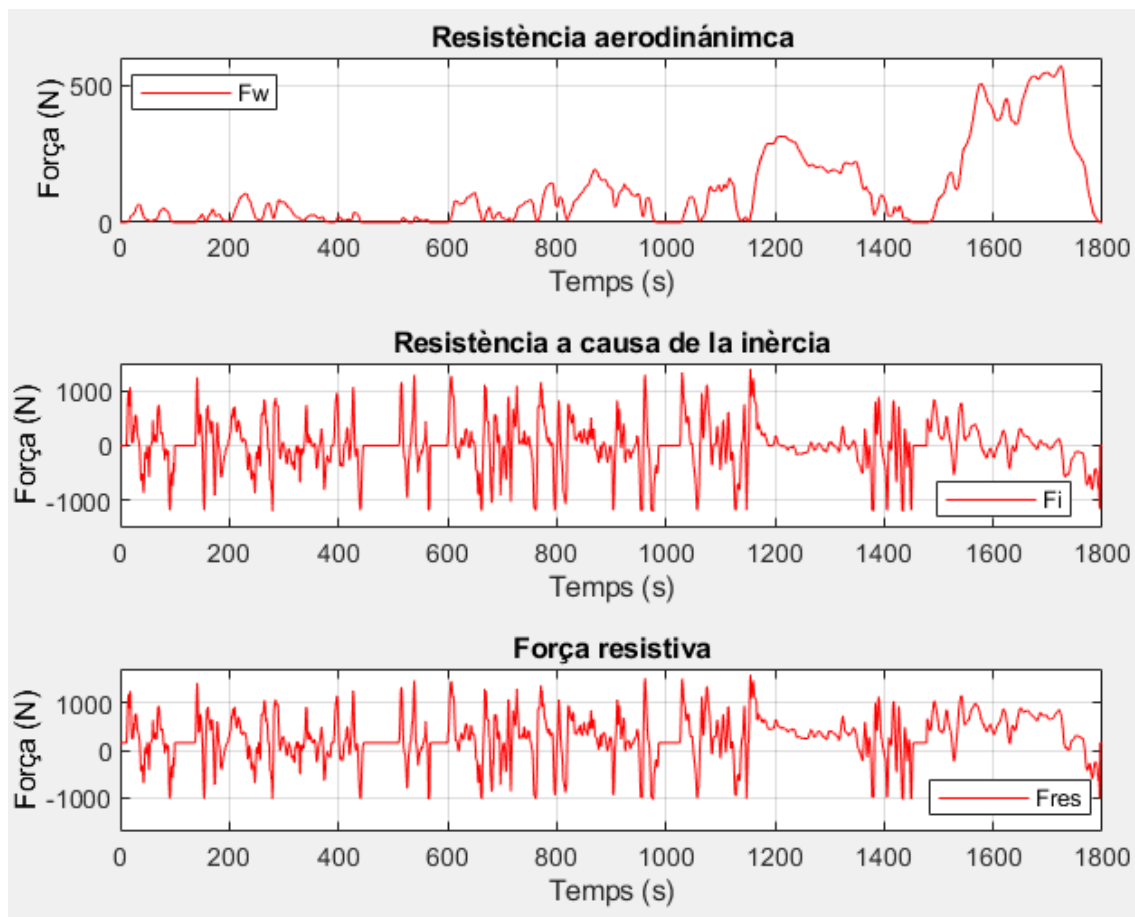


Figura 2.27. Resistència aerodinàmica, resistència a causa de la inèrcia i força resistiva de la càrrega seguint el perfil WLTP classe 3. Font: [pròpia].

### 2.3.2. Resultats del vehicle elèctric

Gràcies a que s'ha implementat el model del vehicle fent ús de la metodologia EMR es poden analitzar els resultats de les simulacions del vehicle com si aquest fos un vehicle elèctric pur. Això no ha comportat una càrrega excessiva de feina ja que la metodologia EMR implica la modelització per blocs i la posterior unió d'aquests blocs, així que simplement s'han eliminat els components de la branca de la pila de combustible i s'han realitzat les simulacions que es mostren a continuació.

A tall il·lustratiu es mostra el comportament del vehicle seguint el perfil WLTP classe 3. En aquest cas es pot comprovar com la velocitat del vehicle no supera el màxim pel que està dissenyat el motor implementat, 60 km/h. No obstant, es pot comprovar a la Figura 2.28 com la velocitat real del vehicle segueix la velocitat de referència fins el màxim esmentat gràcies al control proporcional integral.



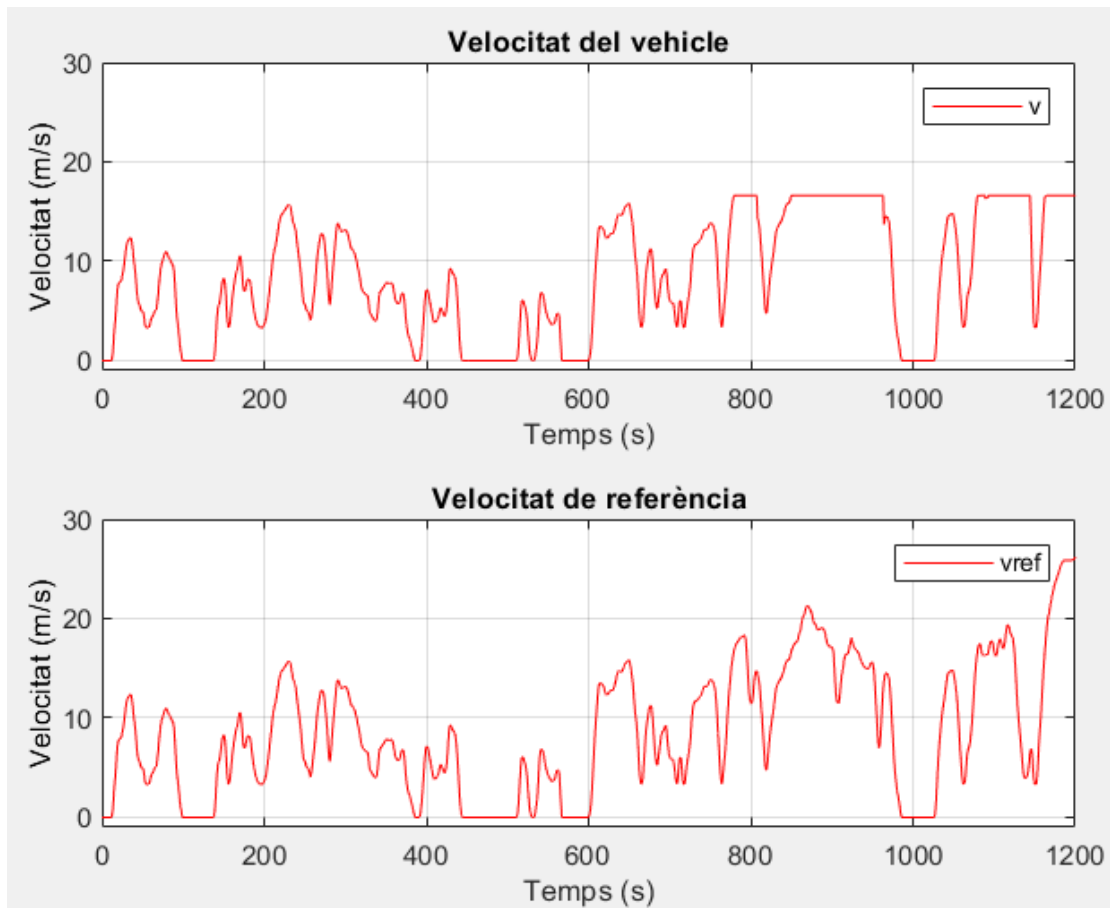


Figura 2.28. Velocitat de referència i la velocitat del vehicle seguint el perfil WLTP classe 3. Font: [pròpia].

### 2.3.3. Resultats del vehicle híbrid

La finalitat del treball és comprovar i validar el correcte funcionament del model del vehicle híbridat amb pila de combustible d'hidrogen i bateries. Per fer això es mostren i comenten diferents escenaris.

En primer lloc, a la primera simulació (Figura 2.29) es marca una velocitat de referència de 0 a 60 km/h en forma d'esglaó i es comprova com el vehicle assoleix aquesta velocitat en un període de temps de menys de 8 segons. Això s'aconsegueix gràcies al control del model, el qual assegura que si pot seguir un valor de referència tipus esglaó, seguirà a la perfecció una entrada tipus rampa.

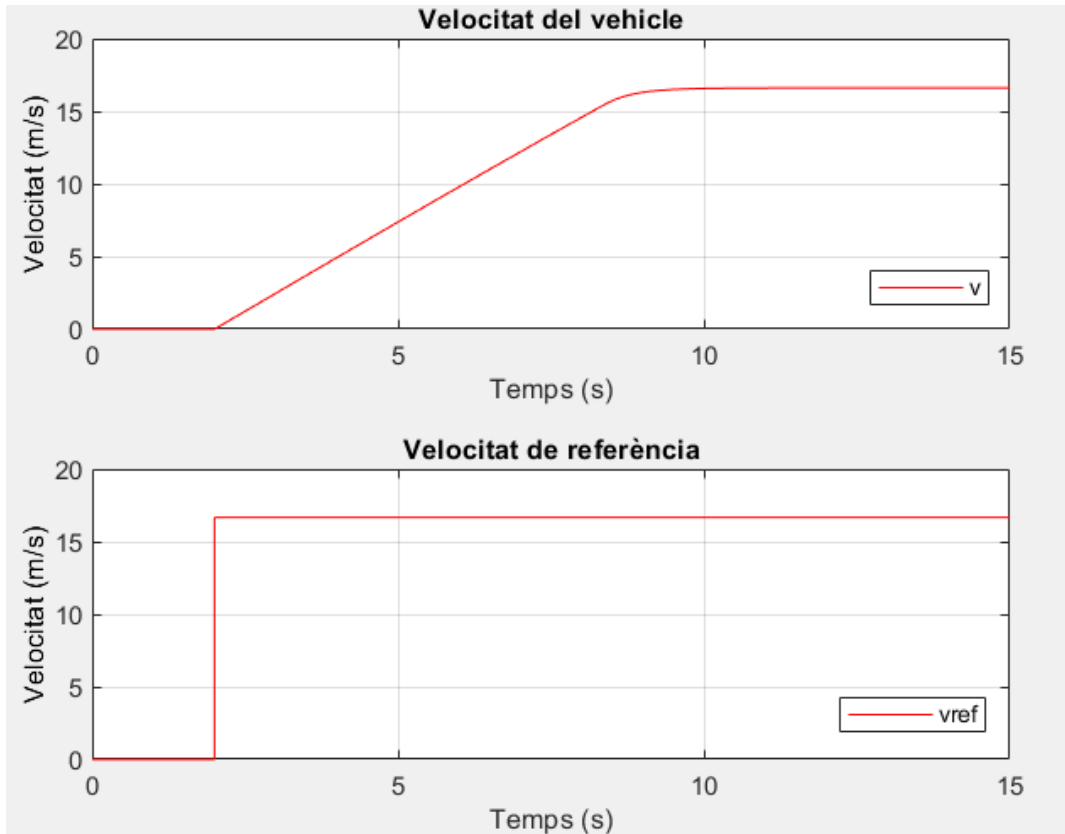


Figura 2.29. Velocitat del vehicle i de referència de 0 a 60 km/h. Font: [pròpia].

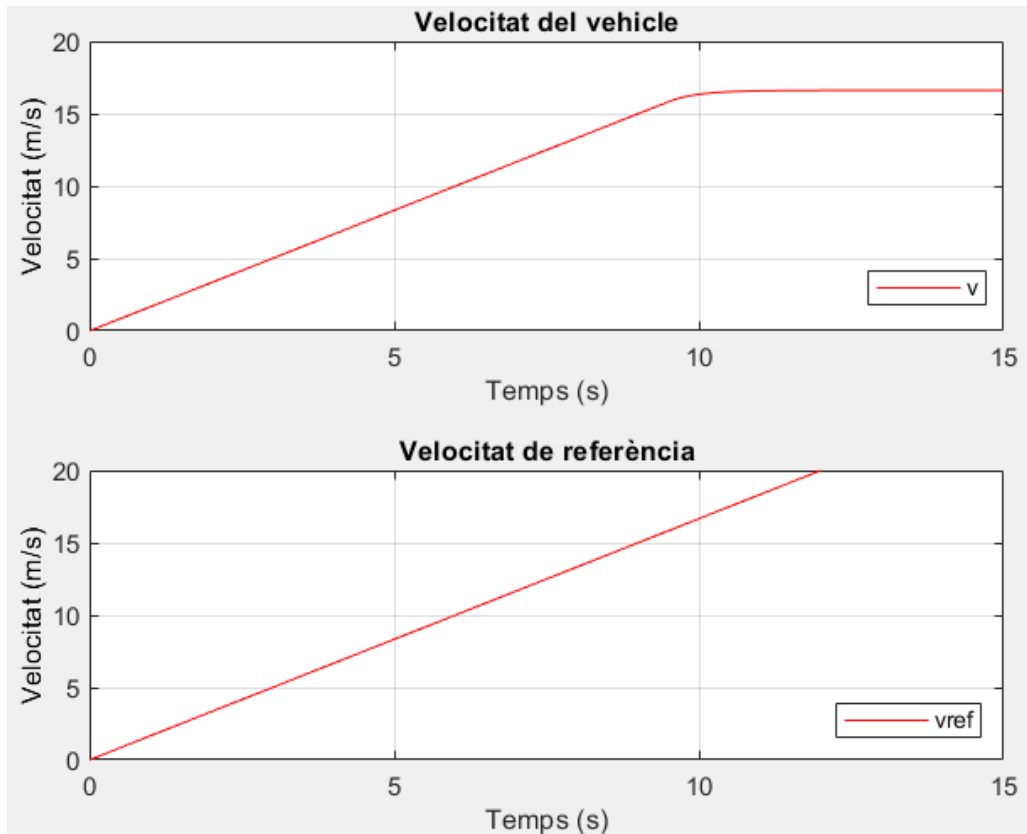


Figura 2.30. Acceleració del vehicle i de referència de 0 a 60 km/h en 10 segons. Font: [pròpia].

A la Figura 2.30 es pot veure com el vehicle segueix una referència amb uns requeriments energètics semblants als del cas anterior però en aquest cas del tipus rampa. A la figura anterior també es comprova la velocitat màxima a la que pot arribar el model del vehicle implementat, amb un valor de 60 km/h. Tot i que la velocitat de referència segueix augmentant, s'arriba a la velocitat màxima aproximadament als deu segons.

A les Figures 2.31 i 2.32 s'ha simulat la mateixa velocitat de referència que en el cas de la Figura 2.29. No obstant, en aquests casos s'ha volgut comprovar la influència que té el pendent a l'hora d'accelerar.

En el cas de la figura adjunta a continuació s'ha imposat un pendent del 10% i es pot veure com el vehicle tarda més en arribar a la velocitat de referència.

D'altra banda, a la Figura 2.32 s'ha volgut comprovar quin és el màxim valor de pendent en condicions de velocitat màxima a la que pot arribat el vehicle. Fent diverses simulacions s'ha vist que el valor màxim del pendent que pot superar el model és del 26%. Tot i ser positiva i anar incrementant, la velocitat no segueix el valor de referència com en els casos anteriors.

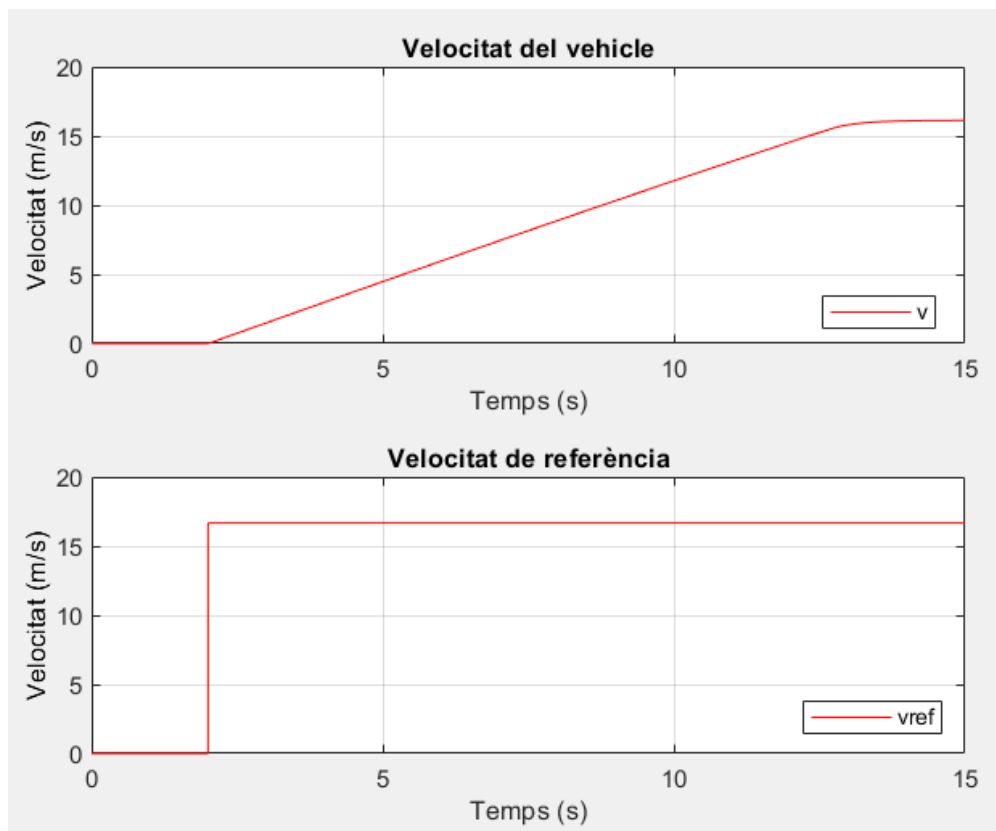


Figura 2.31. Velocitat del vehicle i de referència de 0 a 60 km/h amb un pendent del 10%. Font: [pròpia].

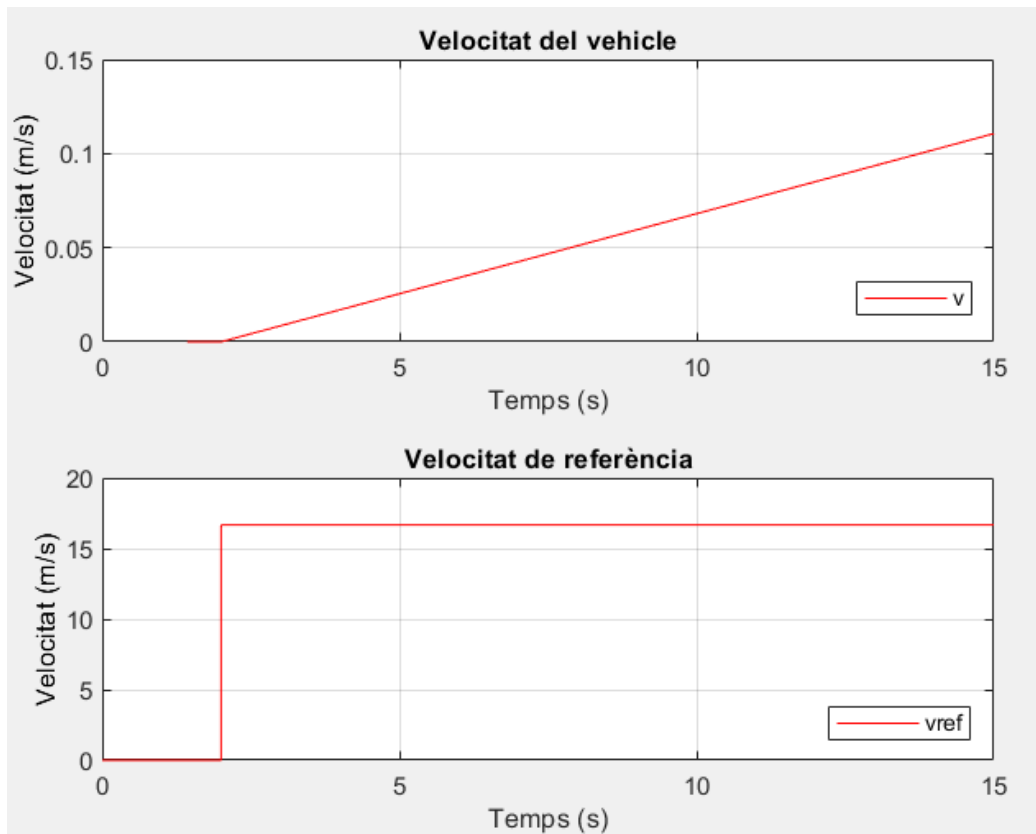


Figura 2.32. Velocitat del vehicle i de referència amb un pendent del 26%. Font: [pròpia].

A les Figures 2.33, 2.34, 2.35 i 2.36 es pot veure com el corrent i el parell del motor generat per seguir el cicle WLTP 3 són proporcionals. A més, també s'analitza el *duty cycle*, el valor del qual s'ha de trobar entre 0 i 1. Es veu també com aquest valor és proporcional a la velocitat.

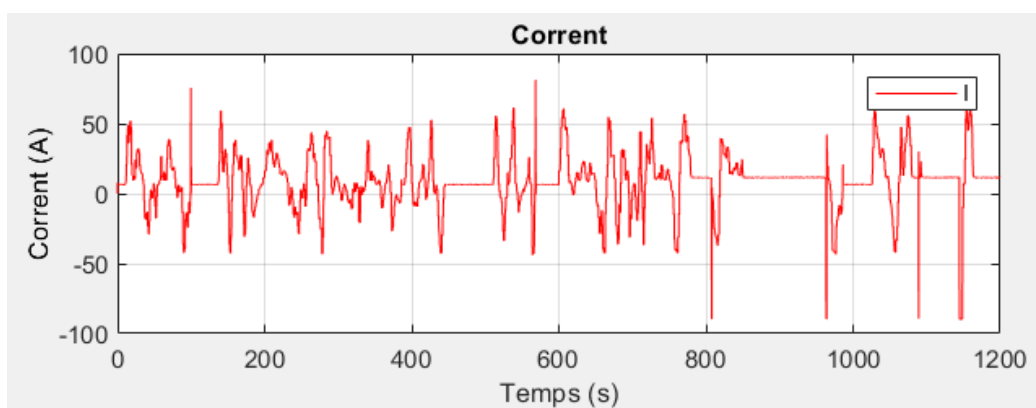


Figura 2.33. Corrent del motor seguint el cicle WLTP classe 3. Font: [pròpia].

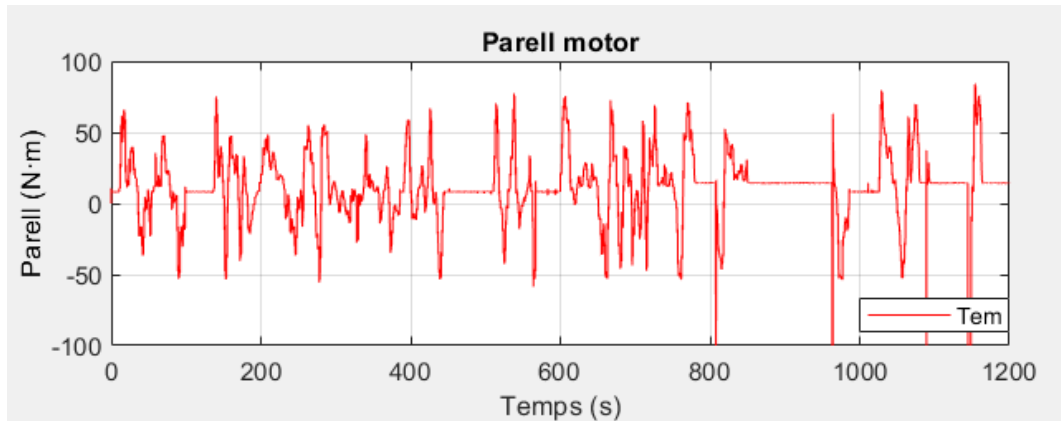


Figura 2.34. Parell motor seguint el cicle WLTP classe 3. Font: [pròpia].

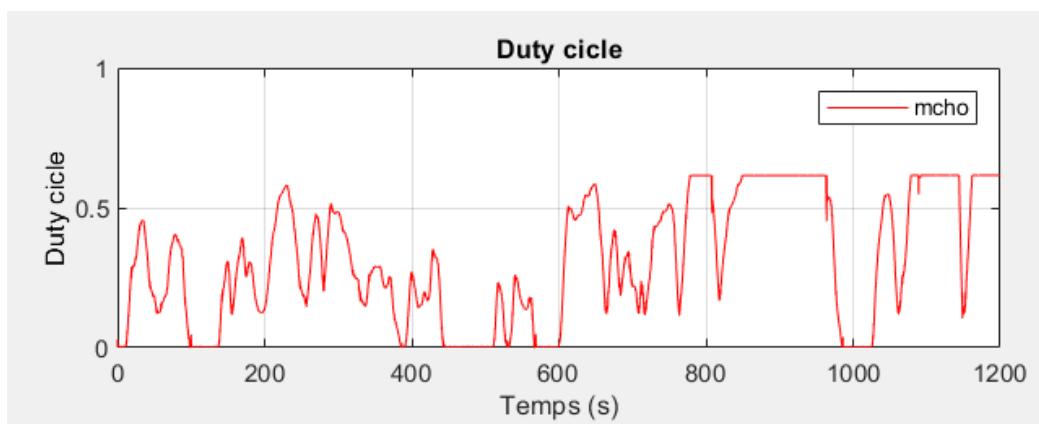


Figura 2.35. Duty cycle seguint el cicle WLTP classe 3. Font: [pròpia].

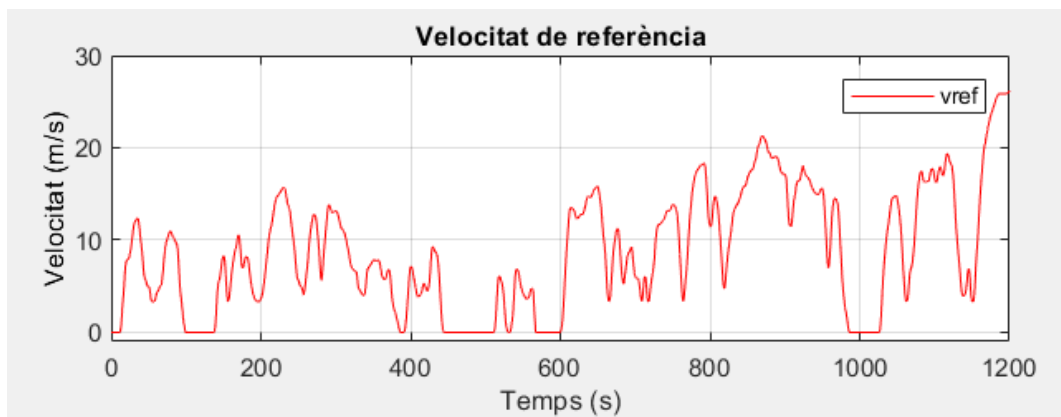


Figura 2.36. Velocitat de referència del cicle WLTP classe 3. Font: [pròpia].

Una de les diferències principals amb el vehicle elèctric pur és el bloc d'acoblament, que actua com a node entre el corrent el corrent requerit per la càrrega ( $I_{cho}$ ), el corrent provinent de la pila de combustible ( $I_c$ ) i el corrent alliberat i absorbit pel banc de bateries ( $I_{bat}$ ).

A les Figures 2.37 i 2.38 s'analitza el comportament del corrents en aquest bloc i la distribució energètica entre les fonts i el consum.

A la Figura 2.37 s'ha limitat el corrent provinent de la pila de combustible a 15 A de manera que els pics pe sobre d'aquest corrent els haurà de suplir la bateria.

Es comprova que es cobreixen els pics de demanda amb l'energia emmagatzemada a la bateria. A més, les bateries permeten implementar l'estratègia de frenat regeneratiu, de manera que el corrent generat pel motor en règim de frenat es converteix en energia emmagatzemada per usos posteriors.

En aquest cas s'ha definit la estratègia de gestió per tal que el valor mig del corrent provinent de la pila de combustible tingui un valor de 9,76 A.

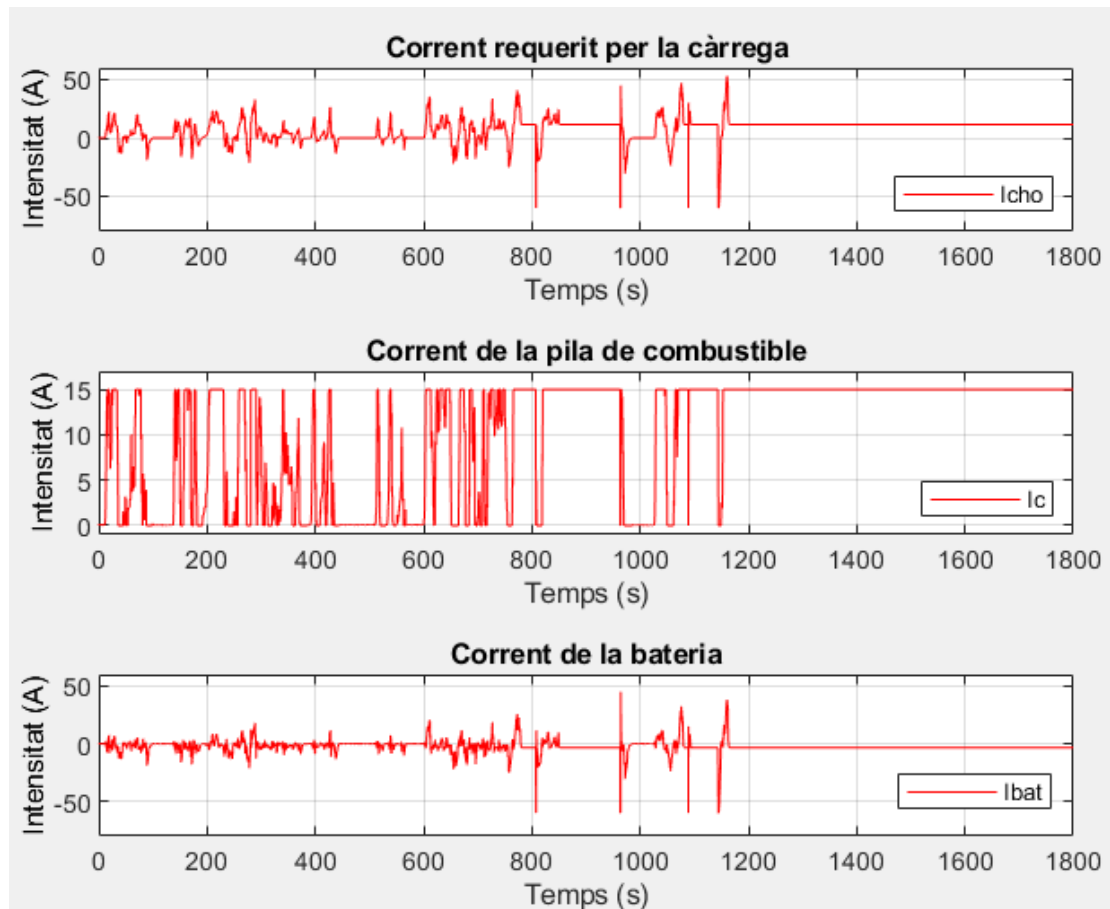


Figura 2.37. Corrent requerit per la càrrega, corrent de la pila de combustible i corrent de la bateria, seguin el perfil WLTP classe 3. Font: [pròpia].

En el següent cas es comprova com, variant l'estratègia de gestió, això és, variant el valor del bloc *strategy*, s'aconsegueix augmentar el valor mig del corrent de la pila de combustible fins a 10,9 A. Això és útil ja que l'ús de la bateria permet a la pila funcionar en règims més propers al nominal, augmentant el rendiment i la vida útil de la font d'alimentació principal del vehicle, la pila de combustible.

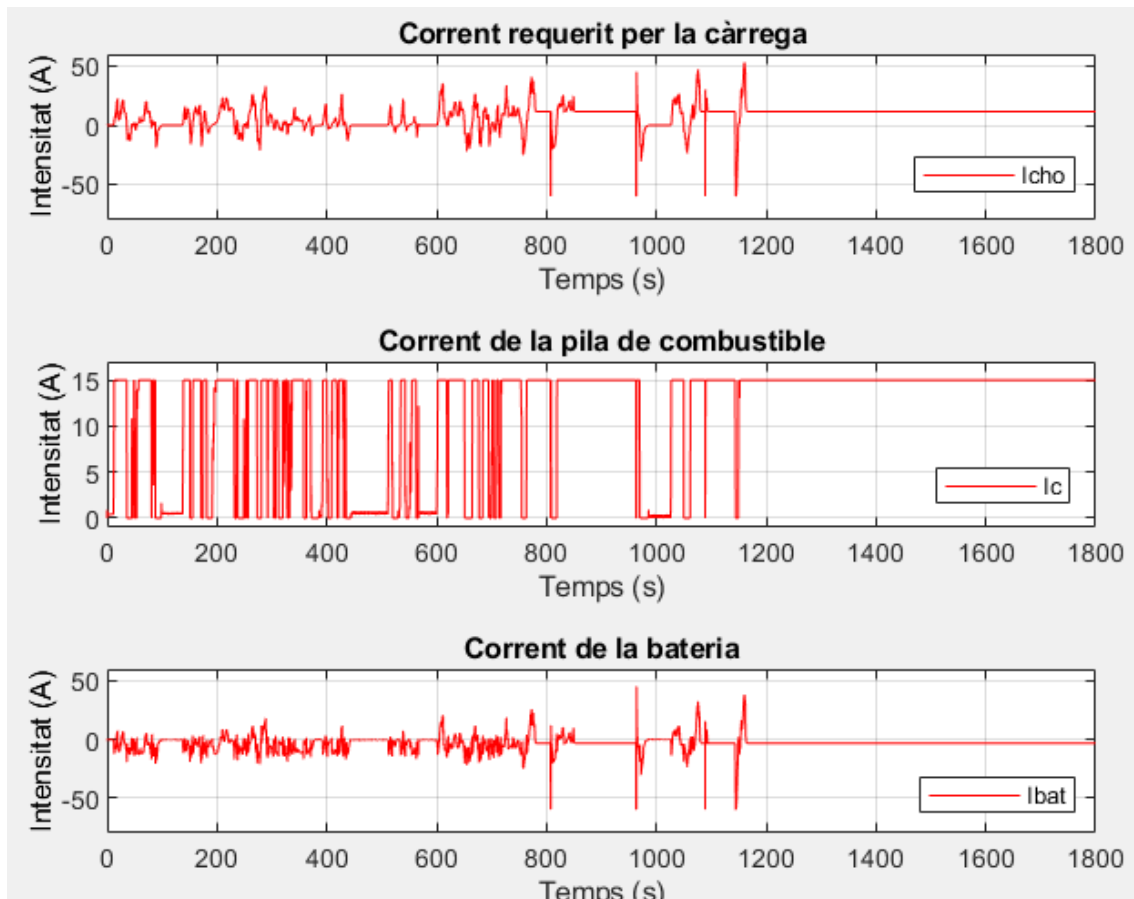


Figura 2.38. Corrent requerit per la càrrega, corrent de la pila de combustible i corrent de la bateria, seguin el perfil WLTP classe 3. Font: [pròpia].

### 2.3.4. Prestacions del vehicle

A continuació s'adjunta una taula amb les prestacions del vehicle modelitzat, extretes de les simulacions exposades als apartats anteriors.

Taula 2.13. Prestacions del vehicle modelitzat. Font: [pròpia].

Acceleració de 0 a 60 km/h	7 segons
Velocitat màxima	60 km/h amb 0% de pendent
Pendent màxim a 60 km/h	12 %
Màxima pendent	26 %

### 3. Pressupost

A continuació s'analitzen els costos referents a la realització del present projecte. Es diferencien dues tipologies de costos, els directes, referents al temps, dedicat tant a les tasques de cerca d'informació i redactat de la memòria, com a la realització del model energètic estudiat. En segon lloc els costos indirectes, vinculats a les eines utilitzades tant de programari com físiques pel correcte desenvolupament del treball.

#### 3.1. Costos directes

Com a costos directes s'entenen els associats a les hores necessàries per a dur a terme el treball realitzat. Es comptabilitzaran les hores dedicades a la recerca d'informació i documentació, a la confecció de la memòria i generació d'esquemes per a millorar les explicacions, i a la realització del model mitjançant programari Matlab.

El cost per hora de cada una de les activitats s'ha definit segons el grau de dificultat de l'activitat en qüestió. Es considera que les d'investigació i confecció de la memòria són activitats amb menys requeriments tècnics, de manera que el costos d'aquestes feines són menors que el de desenvolupament del model. Així doncs, els costos associats a les feines són, per un becari, de 10 €/h, i per un enginyer junior, de 25€/h.

Taula 3.1. Costos directes. Font: [pròpia].

Activitat	Cost (€/h)	Hores (h)	Total (€)
Investigació i documentació	10	60	600
Confecció de la memòria	10	90	900
Desenvolupament del model	25	180	4.500
<b>Total</b>		<b>320</b>	<b>6.000</b>

Com es pot veure a la Taula 3.1, el temps total dedicat al desenvolupament i realització del Treball Final de Màster és de 320 hores com un cost de 6.000 €.

Les hores atribuïdes a cada una de les tasques s'han anat comptabilitzant durant la realització del treball. No obstant, cal fer esment que la classificació de les hores de feina és aproximada, ja que s'han realitzat de manera complementaria les unes amb les altres de manera que, per exemple, es confeccionava la memòria alhora que es treballava en el model energètic.



## 3.2. Costos indirectes

Per a la realització del treball s'ha fet ús de diferents eines tant físiques com de software que contribueixen a encarir el pressupost del projecte. Els costos associats a aquestes partides es defineixen com costos indirectes a la confecció del projecte.

Concretament s'han utilitzat diverses eines del programari d'Office 2016, s'ha fet ús del programa Mendeley per generar la bibliografia y, pel disseny i simulació del model energètic s'ha utilitzat el programa Matlab. A més, es comptabilitza també el cost del material d'oficina utilitzat essent aquest d'uns 15 € aproximadament.

Taula 3.2. Costos directes. Font: [pròpia].

Partida	Total (€)
Llicència Office 2016	260,00
Llicència Mendeley (lliure accés)	0,00
Llicència anual Matlab	800,00
Material d'oficina	15,00
	<b>1.075,00</b>

Com es pot veure a la Taula 3.2. els costos totals indirectes sumen 1.075 €, tenint en compte que les llicències del programes Offices 2016 y Matlab s'han adquirit per un període anual i que el programa per a la generació de bibliografies és d'accés lliure.

## 3.3. Costos totals

En aquest apartat es mostra el total dels costos associats a la realització del treball Final de Màster amb títol "Desenvolupament del model energètic d'un vehicle híbrid".

Taula 3.3. Costos totals. Font: [pròpia].

Partida	Total (€)
Costos directes	6.000,00
Costos indirectes	1.075,00
<b>TOTAL (IVA EXCLÓS)</b>	<b>7.075,00</b>

## 4. Estudi mediambiental

A continuació s'analitza l'impacte que té o que podria tenir la implementació dels vehicles híbrids d'hidrogen en el parc automobilístic mundial sobre el medi ambient. Aquest estudi és una eina de gran valor per determinar si això tindria un impacte positiu o no en el còmput de la seva vida útil.

En aquest cas, el treball versa sobre la modelització del sistema energètic d'un vehicle híbrid d'hidrogen i la seva implementació mitjançant Matlab. Atès que la totalitat del projecte es fa en format informàtic es pot dir que com a impacte ambiental no s'ha de comptabilitzar res més que el consum energètic de l'ordinador utilitzat. És per això s'estudiarà l'impacte que tindria la implantació del sistema estudiat al món.

Un dels objectius principals dels vehicles híbrids amb pila de combustible és el de reduir l'impacte ambiental que tenen els automòbils de combustió interna. Com ja s'ha comentat, aquests vehicles són fonts de generació de gasos d'efecte hivernacle, concentrades, normalment, a les grans ciutats. En aquest sentit, els vehicles de pila de combustible suposen una gran millora ja que com a únic residu generen  $H_2O$ . No obstant, aquest estudi no tracta de l'anàlisi de la millora únicament ambiental, sinó que es pretén avaluar els possibles efectes que pot tenir la implementació dels vehicles d'aquest tipus en el medi que els envolta, al llarg de tota la vida útil i en el procés de tractament de residus.

### 4.1. Cicle de vida

Tots els elements tenen un determinat cicle de vida, amb les etapes que consten a la Figura 4.1., des de l'extracció de la matèria prima fins al procés de reciclatge o rebuig que se li apliqui a l'objecte en qüestió, passant per totes les etapes corresponents.

A causa de la gran dificultat i inversió de temps que requeriria analitzar el cicle de vida de cadascun dels elements que componen un vehicle híbrid com l'estudiat, a continuació s'analitza de manera general cada etapa sense posar especial èmfasis en cap element en concret. Els elements a estudiar seran:

- Vehicle en general
- Pila de combustible
- Bateries



Figura 4.1. Etapes de la vida del vehicle hibridat amb pila de combustible. Font: [36].

## 4.2. Impacte d'implantació dels FCEV

Primerament, tal i com s'ha comentat anteriorment, per disposar de l'autonomia adequada s'haurà de substituir la xarxa de gasolineres existents per una xarxa de distribució d'hidrogen, la qual cosa comportarà una inversió inicial i un manteniment posterior considerables. A més, es requerirà una gran quantitat de material per poder distribuir de forma satisfactòria l'hidrogen, amb el consum de matèria prima que això impliqui. No obstant, a llarg termini i quan s'hagi finalitzat el procés d'adaptació, acabarà sent un canvi positiu ja que es substituirà el consum de combustibles fòssils, un dels grans problemes

actuals pel medi ambient, pel de l'hidrogen, que únicament genera aigua com a residu.

Pel que fa les bateries, tenen una vida útil determinada i són de difícil reciclatge. Per altra banda, s'ha de tenir en compte que l'alternativa als vehicles d'hidrogen són els purs elèctrics, el quals que requereixen molta més capacitat de bateries i, per tant, generaran més residus. Així doncs, es considera una alternativa viable pel que fa les bateries respecte els vehicles purs elèctrics. A més, per normativa, s'hauran de portar a un centre de tractament que les processi de la manera més efectiva possible evitant així un gran impacte.

D'altra banda, s'ha de contemplar la gran millora en quant a contaminació acústica que tindria la implantació dels vehicles alimentats amb pila de combustible, millorant el nivell de vida a les grans ciutats. En aquest sentit, s'hauria de mirar d'implantar un sistema que mantingués a ratlla els accidents en via pública, ja que no generar soroll és un factor que augmenta la dificultat de detecció de vehicles.

Les idees exposades són una pinzellada de l'impacte que causaria substituir els vehicles de combustió pel tipus de vehicle estudiat en aquest projecte. Per entendre la cadena d'esdeveniments que es donaria a arrel d'aquest fet s'hauria de fer un estudi molt més complet que el realitzat. De totes maneres, es considera que aquest anàlisi orientatiu és suficient per l'enfocament tècnic d'aquest document.

## Conclusions

Finalment, per concloure el present document es plantegen una sèrie de conclusions, comentaris respecte el treball i un llistat de possibles millores que es podrien haver implementat.

La finalitat principal de la realització d'aquest treball és l'estudi i posterior implementació del model energètic d'un vehicle híbrid alimentat amb pila de combustible i bateria. No obstant, queda dins l'abast del projecte l'estudi d'alternatives a aquesta tipologia de vehicle i de les parts que el constitueixen, així com també plantejar la problemàtica actual respecte el model de mobilitat existent.

El fet que cada any la demanda en el sector del transport vagi en augment i que la contaminació associada a aquest sigui un dels principals problemes mediambientals del planeta, evidència que el model de mobilitat actual ha de canviar. En aquest sentit, existeixen diferents possibilitats, entre les quals es troba la implementació en el parc automobilístic mundial dels vehicles alimentats amb pila de combustible amb suport de bateries. Aquesta tecnologia sumada a les grans possibilitats de l'hidrogen en altres sectors energètics podria fer possible reduir la generació de gasos d'efecte hivernacle.

Pel que fa l'estudi i implementació del model energètic del vehicle, primerament comentar que el fet d'utilitzar la metodologia EMR ha facilitat molt aquesta tasca, ja que permet la modelització per blocs aïllats i la posterior unió d'aquests. A més, aquesta metodologia fa possible la millora de les parts del vehicle per separat, un gran avantatge en un sistema tant complex com el tractat, ja que, per exemple, es podria modificar la tipologia de motor elèctric utilitzat sense haver de fer grans canvis en el model en general.

D'altra banda, s'ha pogut implementar el model d'un vehicle i estudiar els resultats de les simulacions. S'ha comprovat la distribució energètica entre les dos fonts, a més de fer-se a la idea de la demanda energètica que comporta alimentar una càrrega d'aquestes característiques.

Cal fer esment d'una de les problemàtiques trobades durant el desenvolupament del treball. La manca d'experiència en l'ús del programari utilitzat per a la implementació del model ha dificultat la realització del projecte. Malgrat això, s'han pogut resoldre els errors i problemàtiques i extreure resultats de manera satisfactòria.

Finalment es proposen una sèrie de millores que es podrien estudiar en un futur per a continuar amb el desenvolupament del projecte:

- Millora dels models interns corresponents a cada bloc del vehicle.
- Introducció de pèrdues en el model.

- Estudi d'alternatives en la modelització del motor, el control i els convertidors, contemplant diferents tipologies d'elements per comprovar quina dona millors resultats.
- Estudi mediambiental més desenvolupat.
- Implementació de la funció de frenat del vehicle.

Cal dir que el tema tractat en aquest treball és molt extens. Entendre cadascuna de les parts del vehicle i les diferents possibilitats a implementar és una feina que, desenvolupada per un equip, es podria dur a terme de manera més eficient i amb més profunditat.



## Agraïments

Vull donar les gràcies al meu tutor, Daniel Montesinos, per la seva ajuda, consell i paciència, sense els quals no hauria superat les complicacions que se m'han anat presentat durant el desenvolupament del projecte.

També voldria agrair l'ajuda i recolzament als meus pares, al meu germà i amics per fer-me costat durant el temps que ha durat la realització d'aquest treball.



## Bibliografia

- [1] “Balanz energètic de Catalunya. Institut Català d’Energia.” [Online]. Available: [http://icaen.gencat.cat/ca/energia/estadistiques/resultats/anuals/balanc\\_energetic/](http://icaen.gencat.cat/ca/energia/estadistiques/resultats/anuals/balanc_energetic/). [Accessed: 05-Apr-2021].
- [2] “Consulta sobre l’avaluació ambiental del pla director de mobilitat (PDM) 2020-2025.” Generalitat de Catalunya; Consell Assesor per al Desenvolupament Sostenible, p. 7, 2019.
- [3] A. París, “Consum i demanda al sector del transport.” [Online]. Available: <https://www.sostenible.cat/reportatge/energia-7-consum-i-demanda-al-sector-del-transport-es-possible-transformar-el-model>. [Accessed: 29-Apr-2021].
- [4] J. Pallisé, F. Astals, I. Cairó, J. Comellas, F. Martínez, and J. Serra, *Diagnosi i perspectives del vehicle elèctric a Catalunya*. 2010.
- [5] B. Plumer, “¿Qué es el Acuerdo de París?,” *The New York Times*, 2017. [Online]. Available: <https://www.nytimes.com/es/2017/06/01/espanol/que-es-el-acuerdo-de-paris.html>. [Accessed: 05-Apr-2021].
- [6] F. Calviño, “Rendiments.” Universidad Politécnica de Barcelona, pp. 1–2.
- [7] E. Delgado Ferrer, “Estudio y modelización de una pila de Combustible SOFC,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [8] C. Fernández-Bolaños Badía, “Energética del hidrógeno, Almacenamiento,” 2005.
- [9] R. Pozo Baquero, “Almacenamiento de Hidrógeno – ARIEMA,” 2019. [Online]. Available: <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>. [Accessed: 03-May-2021].
- [10] O. Santiago, “3 métodos para el almacenamiento de hidrógeno,” 2016. [Online]. Available: <http://apilados.com/blog/3-metodos-almacenamiento-hidrogeno/>. [Accessed: 03-May-2021].
- [11] C. Fernández-Bolaños Badía, “Energética del hidrógeno, Distribución,” 2005.
- [12] “Arabia Saudí tiene claro cuál es el petróleo del futuro: el hidrógeno.” *Magnet*, 2021. [Online]. Available: [https://magnet-xataka.com.cdn.ampproject.org/v/s/magnet.xataka.com/en-diez-minutos/arabia-saudi-tiene-claro-cual-petroleo-futuro-hidrogeno-tambien-quiere-dominarlo/amp?amp\\_js\\_v=a6&amp\\_gsa=1&usqp=mq331AQFKAGwASA%3D#ao\\_h=16142936658805&csi=0&referrer=https%252E](https://magnet-xataka.com.cdn.ampproject.org/v/s/magnet.xataka.com/en-diez-minutos/arabia-saudi-tiene-claro-cual-petroleo-futuro-hidrogeno-tambien-quiere-dominarlo/amp?amp_js_v=a6&amp_gsa=1&usqp=mq331AQFKAGwASA%3D#ao_h=16142936658805&csi=0&referrer=https%252E). [Accessed: 20-Feb-2021].
- [13] L. de la Quintana and C. Cándido, “¿Y si el hidrógeno ganara la batalla a las baterías eléctricas en el coche del futuro?,” *El Economista*, 2020. [Online]. Available: <https://www.economista.es/mercados-cotizaciones/noticias/10831651/10/20/Y-si-el-hidrogeno-ganara-la-batalla-a-las-baterias-electricas-en-el-coche-del-futuro-.html>. [Accessed: 15-Mar-2021].
- [14] J. Rodríguez Lluva, “Estudio de la evolución en el transporte rodado motorizado y

- su implicación en el taller de reparación de pequeño tamaño,” Universidad Politécnica de Madrid, 2019.
- [15] R. Aláez Aller and E. Al, *Del motor de combustión interna al vehículo eléctrico: cuatro alternativas técnicas*, no. 377. 2010, pp. 95–108.
- [16] “EU Science Hub,” *The European Commission’s science and knowledge service*, 2018. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/electric-or-conventional-car-what-influences-car-buyers-eu>. [Accessed: 15-May-2021].
- [17] E. Cortez, “Aportaciones al dimensionamiento y gestión de energía de un tren de potencia eléctrico híbrido para vehículos industriales con ciclos de conducción repetitivos y agresivos,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
- [18] J. Balakrishnan, “Fuel cell technology,” Ontario, 2007.
- [19] J. Peña Martínez *et al.*, “Pilas de combustible,” 2006.
- [20] P. Guiu Llopart, “Microxarxa d’alimentació híbrida, amb suport fotovoltaic i generació dièsel, per a instal·lacions d’ús públic amb carga elèctrica feble,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
- [21] E. Álvarez Pelegry *et al.*, *El almacenamiento de energía en la distribución eléctrica del futuro*. Real Academia de Ingeniería, 2017.
- [22] C. Abarca Aguilar, “Motorización eléctrica y homologación de un coche deportivo monoplaça para que pueda circular por ciudad,” Universitat Jaume I, 2019.
- [23] I. K. Won, A. Y. Ko, D. Y. Kim, C. Y. Won, and Y. R. Kim, “Regenerative control of bi-directional DC-DC converter controlling variable DC-link for FCEV,” Suwon, 2014.
- [24] A. Bouscayrol *et al.*, “Teaching drive control using energetic macroscopic representation,” Aalborg, 2007.
- [25] G. Domènech Garrido, “Desenvolupament del model energètic d’un vehicle híbrid,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2021.
- [26] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, and A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*. 2005.
- [27] R. Prats González, “Disseny d’un vehicle elèctric d’ús urbà,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [28] D. Montesinos i Miracle, “Disseny , simulació i control d’un convertidor.” pp. 3–4.
- [29] A. Bouscayrol, “Study of Energetic Systems using Energetic Macroscopic Representation.” 2013.
- [30] O. Tremblay, L.-A. Dessaint, and A.-I. Dekkiche, “A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles,” IEEE, 2007.
- [31] N. M. Souleman, O. Tremblay, and L. A. Dessaint, “A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles,” IEEE, 2009.

- [32] A. Castaings, W. Lhomme, R. Trigui, and A. Bouscayrol, "Different control schemes of a battery/supercapacitor system in electric vehicle," IEEE, 2014.
- [33] R. Villà, *Dinàmica de sistemes*. .
- [34] D. Montesinos i Miracle, "Converter design for vehicle application." .
- [35] A. Castaings, W. Lhomme, R. Trigui, and A. Bouscayrol, "Energy management in EVs using battery and supercapacitors: Algebraic loop issue." IEEE, pp. 1–9, 2014.
- [36] P. Xicoi, "Anàlisi de l'impacte ambiental." pp. 1–5.

## **Annexos**

### **Annex A: Paràmetres del vehicle**

Adjunt en format digital (.m): "TFM\_PolGuiu\_AnnexA\_Paràmetres"

### **Annex B: Vehicle elèctric**

Adjunt en format digital (.slx): "TFM\_PolGuiu\_AnnexB\_VehicleElèctric"

### **Annex C: Vehicle híbrid**

Adjunt en format digital (.slx): "TFM\_PolGuiu\_AnnexC\_VehicleHbird"

### **Annex D: Forces del vehicle**

Adjunt en format digital (.slx): "TFM\_PolGuiu\_AnnexD\_ForcesVehicle"

### **Annex E: Pila de combustible**

Adjunt en format digital (.slx): "TFM\_PolGuiu\_AnnexE\_PilaCombustible"

### **Annex F: Bateria**

Adjunt en format digital (.slx): "TFM\_PolGuiu\_AnnexF\_Bateria"

