Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Enginyeria Industrial, ICT Mecànic

Projecte Final de Carrera

Autor: Rubén Prats González

Disseny d'un vehicle elèctric d'ús urbà

Director: David Huguet

Contingut d'aquest volum:

- Memòria -

Data de Lliurament: Juny de 2012

AGRAÏMENTS

Vull agrair la col·laboració a totes aquelles persones que d'una manera o d'una altra m'han ajudat a realitzar aquest Projecte Final de Carrera.

En primer lloc, als meus pares i al meu germà per donar-me suport durant tots aquests anys d'estudi. Sense ells tot això no hagués estat possible.

Al David Huguet per acceptar dirigir-me aquest projecte i per la seva atenció i el seu temps.

També vull agrair a l'Alberto Adrià, per ajudar-me als inicis del projecte.

Vull donar les gràcies al Robert Castilla per donar-me el seu punt de vista alhora de documentar la simulació CFD. Als membres de MCIA Research Group Tomasz Dobromir i Ramin Salehi, especialment a aquest últim per atendre'm i ajudar-me amb la simulació del BEV, mostrant tant interès.

Vull agrair també al Sergi Borja Jordi, company de la universitat, tots aquests anys tan bons que em passat amés de la seva ajuda i col·laboració desinteressada.

Finalment vull fer un agraïment molt especial a la Laia, per ser com és, per tractar-me tant bé en tot moment, i especialment en aquests últims dies, i per donar-me tot el seu suport.

TAULA DE CONTINGUTS

1. INTRODUCCIÓ I PLANTEJAMENT DEL PROJECTE 1
1.1. MOTIVACIÓ PERSONAL 1
1.2. OBJECTIUS 1
1.3. ABAST DEL PROJECTE 2
2. SITUACIÓ ACTUAL 3
2.1. INTRODUCCIÓ 3
2.2. PROBLEMÁTICA DELS VEHICLES AMB MOTORS TÈRMICS 3
2.3. L'OPCIÓ DEL VEHICLE ELÈCTRIC 4
3. PARC AUTOMOBILÍSTIC ACTUAL 6
3.1. PROBLEMÀTICA 6
3.2. CARACTERÍSTIQUES DELS VEHICLES DEL SEGMENT A 6
3.2.1. VELOCITAT MÀXIMA 7
3.2.2. ACCELERACIÓ 7
3.2.3. CONSUM 8
4. DETERMINACIÓ DE LES ESPECIFICACIONS DESITJADES 11
4.1. CARACTERÍSTIQUES DE LA MOBILITAT URBANA. 11
4.1.1. SITUACIÓ ACTUAL 11
4.1.2. DISTÀNCIES RECORREGUDES 12
4.1.3. MITJANS DE TRANSPORT 13
4.1.4. CONCLUSIONS 13
4.2. CONCEPTE DE VEHICLE 13
4.3. ESPECIFICACIONS DE DISSENY 14
4.4. DESTINATARI 14
5. EL VEHICLE ELÈCTRIC 16
5.1. HISTÒRIA 16
5.2. TIPUS DE VEHICLES ELÈCTRICS 19
5.2.1. VEHICLES ELÈCTRICS DE BATERIES (BEV) 19
5.2.2. VEHICLES ELÈCTRICS HÍBRIDS (HEV) 19

5.2.3. VEHICLES HÍBRIDS ENDOLLABLES (PHEV) 20
5.2.4. VEHICLES ELÈCTRICS AMB CEL·LES DE COMBUSTIBLE 21
5.3. TECNOLOGIES ACTUALS 21
5.3.1. BATERIES 22
5.3.2. MOTORS ELÈCTRICS 26
5.3.3. REGULACIÓ I CONTROL 30
5.3.4. FRENADA REGENERATIVA 32
5.3.5. RECÀRREGA 34
5.3.6. TRANSMISSIÓ 35
5.4. COTXES ELÈCTRICS DISPONIBLES AL MERCAT 35
5.5. AVANTATGES I INCONVENIENTS DELS VEHÍCLES ELÈCTRICS ... 39
6. MODELAT DEL BEV 41
6.1. MODELAT DE LA BATERIA 41
6.1.1. CIRCUIT EQUIVALENT 42
6.1.2. RELACIONS MATEMÀTIQUES 43
6.1.3. MODEL SIMULINK DE LA BATERIA 47
6.1.4. VALIDACIÓ DEL MODEL 48
6.2. MODELAT DINÀMIC DEL BEV 53
6.2.1. MODEL SIMULINK DEL BEV 60
6.2.2. PARÀMETRES DE SIMULACIÓ 67
6.2.3. PRESTACIONS 70
6.2.4. CICLES DE CONDUCCIÓ 76
6.2.5. AUTONOMIA 77
6.2.6. RESULTATS OBTINGUTS 79
6.2.7. CONSUM ENERGÈTIC DEL VEHICLE 87
7. DISPOSICIÓ DELS COMPONENTS DEL BEV 88
8. DISSENY EXTERIOR DEL VEHICLE 90
8.1. OBJECTIUS DEL DISSENY 90
8.1.1. OPTIMITZAZIÓ DEL Cx 90
8.2. PROCÉS DE DISSENY DEL VEHICLE 93
8.2.1. CONFIGURACIÓ DE LES IMATGES DE REFERENCIA 94

8.2.2. DIBUIX DE L'ESTRUCTURA DEL VEHICLE 95
8.2.3. GENERACIÓ DE LES SUPERFICIES 96
9. DINÀMICA DE FLUIDS COMPUTACIONAL (CFD) 99
9.1. INTRODUCCIÓ CFD 99
9.1.1. AVANTATGES I INCONVENIENTS 100
9.1.2. RESUM DEL MÈTODE 101
9.2. RESOLUCIÓ NUMÈRICA DE LES ECUACIONS DE FLUX 102
9.2.1. ECUACIONS DEL MOVIMENT DEL FLUX 102
9.2.2. MODELS DE TURBULÈNCIA 103
9.2.3. MÈTODE DELS VOLUMS FINITS 105
9.2.4. DEPENDÈNCIA DEL TEMPS I NO LINEALITAT 106
9.2.5. CONDICIONS DE CONTORN 107
9.3. METODOLOGIA 108
9.4. SIMULACIÓ CFD 109
9.4.1. SOFTWARE CFD STAR CCM+ 109
9.4.2. ETAPES DE LA SIMULACIÓ CFD 109
10. DISSENY ADOPTAT 121
10.1. EVOLUCIÓ DEL DISSENY 127
10.2. RESULTAT FINAL 135
11. SISTEMES DE RECÀRREGA RENOVABLE EN FUNCIONAMENT 137
11.1. SISTEMA DE CAPTACIÓ EÒLICA 137
11.1.1. L'ENERGIA EÒLICA 137
11.1.2. CONCEPTES DE VEHICLE EÒLIC 139
11.1.3. CARACTERISTIQUES DEL SISTEMA PROPOSAT 140
11.1.4. AVALUACIÓ DEL SISTEMA 144
11.1.5. CONCLUSIONS 146
11.2. SISTEMA CAPTACIÓ SOLAR 146
11.2.1. L'ENERGIA SOLAR 146
11.2.2. CONCEPTES DE VEHICLE SOLAR 149
11.2.3. CARACTERISTIQUES DEL SISTEMA 150
11.2.4. AVALUACIÓ DEL SISTEMA 153

11.2.5. CONCLUSIONS 155
12. CONSIDERACIONS DEL VEHICLE ELÈCTRIC 156
12.1. INTRODUCCIÓ 156
12.2. EFICIÈNCIA ENERGÈTICA DEL VEHICLE ELÈCTRIC 157
12.3. L'ECONOMIA DEL VEHICLE ELÈCTRIC 160
12.4. IMPACTE SOBRE LES EMISSIONS 165
12.5. ACCEPTACIÓ SOCIAL DEL VEHICLE ELÈCTRIC 166
12.6. CONCLUSIONS 167
13. PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE 168
14. PRESSUPOST DEL PROJECTE 170
14.1. COSTOS D'ENGINYERIA 170
14.1.1. COSTOS DIRECTES 170
14.1.2. COSTOS INDIRECTES 170
14.1.3. COSTOS DERIVATS DEL DISSENY 172
14.1.4. COSTOS DERIVATS DE L'ELABORACIÓ DE LA DOCUMENTACIÓ 174
14.2. COST TOTAL DEL PROJECTE 174
15. CONCLUSIONS DEL PROJECTE I POSSIBLES MILLORES 175
15.1. CONCLUSIONS GENERALS 175
15.2. CONCLUSIONS DEL PROJECTE 176
15.3. FUTURES MILLORES DEL PROJECTE 177
16. BIBLIOGRAFÍA 179
16.1. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES: 179
16.2. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA: 180
17. INDEX DE TAULES 182
18. INDEX DE FIGURES 183

1. INTRODUCCIÓ I PLANTEJAMENT DEL PROJECTE

1.1. MOTIVACIÓ PERSONAL

Un dels reptes més importants que es plantegen en la societat actual, és l'estalvi i aprofitament de l'energia. És necessari trobar solucions als problemes energètics que se'ns plantegen, en primer lloc aconseguint un òptim aprofitament de l'energia utilitzada, i també desenvolupant tecnologies que permetin, a partir de fonts d'energia renovables, oferir una alternativa a les fonts d'energia actuals.

El transport és un dels principals consumidors d'energia mundial. Concretament l'automòbil, degut al baix rendiment dels motors tèrmics, és una de les principals fonts de malbaratament energètic. Si a més hi afegim l'ús indiscriminat que en fa la població mundial, en detriment del transport públic, sorgeix un problema que fa que aquest sector, sigui constantment font d'estudis i investigacions per tal d'aportar possibles solucions i alternatives.

Per tant, és un repte en una societat tecnològica tan competitiva, aportar possibles solucions que permetin abordar aquesta problemàtica, intentant reduir el consum energètic dels vehicles actuals sense reduir-ne les prestacions que ofereixen i que siguin viables tan econòmicament, com pel fet de que no siguin necessàries noves infraestructures per al seu desenvolupament.

1.2. OBJECTIUS

En aquest projecte, l'objectiu principal és realitzar el disseny bàsic i generalitzat d'un vehicle elèctric destinat a ús preferentment urbà, però que també pugui ser utilitzat en trajectes per vies ràpides. El vehicle, a més, haurà de disposar d'una autonomia el més amplia possible sense comprometre les dimensions ni el pes del conjunt.

També es planteja la opció d'integrar un sistema de recàrrega, a partir d'energies renovables, que permeti al vehicle auto carregar-se mentre es troba en funcionament. Principalment s'avaluaran les opcions d'incorporar recàrrega solar i recàrrega eòlica, sempre amb l'objectiu d'augmentar l'eficiència del vehicle i conseqüentment la seva autonomia.

Per últim, es pretén crear un disseny exterior amb un baix coeficient aerodinàmic que permeti reduir les pèrdues generades per la resistència aerodinàmica, durant el funcionament del cotxe.

1.3. ABAST DEL PROJECTE

El projecte consistirà en modelitzar la cadena de tracció d'un vehicle elèctric en l'entorn Matlab-Simulink. A partir d'aquest model, es simularà el seu funcionament basat en el cicle de conducció NEDC[1], per realitzar el dimensionat de tots els components, evitant sobre dimensionar-los per tal d'aconseguir el màxim aprofitament energètic. Un cop definits els paràmetres de simulació, s'avaluarà el consum i l'eficiència energètica de tot el conjunt, per tal de poder realitzar una previsió de l'autonomia del vehicle en diferents condicions de simulació i amb la màxima precisió possible.

En aquest projecte només s'avaluarà el procés de descàrrega del vehicle, és a dir, des de que les bateries es troben carregades fins que es buiden, de manera que el sistema de recàrrega principal (carregador i connexió a la xarxa) no es contemplarà.

El desenvolupament del model, es realitzarà a partir de les ineficiències dels diferents components que afecten a l'autonomia final del vehicle. Amb aquesta finalitat, no s'entrarà a modelar components que tinguin més a veure amb el funcionament elèctric del vehicle sinó que es prioritzarà el seu funcionament mecànic. Això es deu a la impossibilitat de compatibilitzar ambdós aspectes per problemes derivats de les condicions de simulació que requereixen, i que són incompatibles les unes amb les altres.

Com a part d'aquest projecte, també es desenvoluparà el disseny exterior del vehicle amb l'objectiu de reduir el coeficient de resistència aerodinàmica (Cx), fet que comportarà una millora en l'eficiència energètica del conjunt. Aquest disseny es realitzarà amb el software de disseny 3D *CATIA V5*, i el resultat final es simularà amb el software de CFD[2] *STAR CCM+* per avaluar les forces i coeficients aerodinàmics d'interès en un vehicle d'aquest tipus, amb el principal objectiu, tal i com ja s'ha comentat, de millorar el Cx.

Finalment, amb el model del vehicle definit, es realitzarà un càlcul de les prestacions i consums reals que tindria el vehicle proposat.

---

[1] *NEDC - New European Driving Cycle*

[2] *CFD - Dinàmica Computacional de Fluids.*

[2] *CFD - Dinàmica Computacional de Fluids.*

[3] *Hatchback – Disseny d'automòbil que consisteix en una cabina o àrea per a passatgers amb un*

2. SITUACIÓ ACTUAL

2.1. INTRODUCCIÓ

El desenvolupament dels automòbils amb motors de combustió, és un dels majors èxits de la tecnologia moderna. No obstant això, el gran desenvolupament de la indústria automobilística i el gran nombre d'automòbils en ús arreu del món, han causat i segueixen causant greus problemes per a la societat i la vida humana. El deteriorament de la qualitat de l'aire, l'escalfament global, i la disminució dels recursos derivats del petroli s'estan convertint en una de les principals amenaces per als éssers humans.

Aquests problemes, s'accentuen si cal, a les grans ciutats, on la mobilitat personal s'ha convertit en una necessitat bàsica i imprescindible (des del punt de vista laboral, comercial o d'oci) i que condueixen a una dependència en augment per part dels ciutadans.

Les normatives, cada vegada més estrictes respecte a les emissions de gasos contaminants, juntament amb les regulacions respecte al consum de combustibles fòssils, estan estimulant l'interès de la societat tecnològica en el desenvolupament d'un transport segur, net i d'alta eficiència.

Actualment, davant l'augment del preu del petroli i les iniciatives de regulació que fomenten la millora de l'eficiència dels vehicles (reducció de les emissions de CO_2 per quilòmetre), es planteja un repte per als fabricants de cotxes que, segons l'estudi "*Powertrain 2020 - The Future Drives Electric*" (1) només amb la millora de la tecnologia de combustió interna no podran assolir. Encara que el potencial de reduir les emissions dels motors de gasolina i dièsel arribarà fins al 40% i 30% respectivament al 2020, encara existeix un gap de més de 10g/km de CO2 respecte l'objectiu europeu de 95g/km.

De manera que, les opcions més prometedores, a mig i llarg termini, passen per avançar en el desenvolupament de vehicles amb tracció elèctrica o híbrida, com a solució al problema del transport terrestre per carretera.

2.2. PROBLEMÁTICA DELS VEHICLES AMB MOTORS TÈRMICS

Un dels principals problemes que presenten els vehicles de combustió, és l'augment constant que pateix el preu del petroli. La disminució de les reserves mundials de cru, així com els conflictes polítics que afecten a alguns del principals països productors, deriven en un augment continu del preu del gasoil i de la gasolina.

A les grans ciutats, és cada vegada més evident la contaminació local que hi ha, deguda en gran part, a les emissions de gasos dels vehicles que hi circulen de forma massiva. Aquesta contaminació té un efecte nociu tant en la qualitat de vida dels ciutadans, com en la seva salut. Amés l'emissió continuada de gasos a l'atmosfera contribueix a accelerar el canvi climàtic, amb tots els efectes que això comporta. És per aquests motius que durant els darrers anys, la societat s'ha anat conscienciant de que cal resoldre aquests problemes, i és per això que actualment s'estan promovent una sèrie de normatives per part dels òrgans administratius i legisladors, que pretenen regular i reduir les emissions.

És doncs un moment, en el que la societat tecnològica ha de dirigir els seus esforços en desenvolupar tecnologies que funcionin a partir de combustibles alternatius i fonts d'energia renovables, de manera que es puguin trobar alternatives viables a l'ús dels motors tèrmics en automoció, sense comprometre les prestacions dels vehicles.

En aquests aspectes, el vehicle elèctric es posiciona com una de les possibles alternatives als automòbils amb motor tèrmic, però tenint en compte que també té les seves pròpies limitacions.

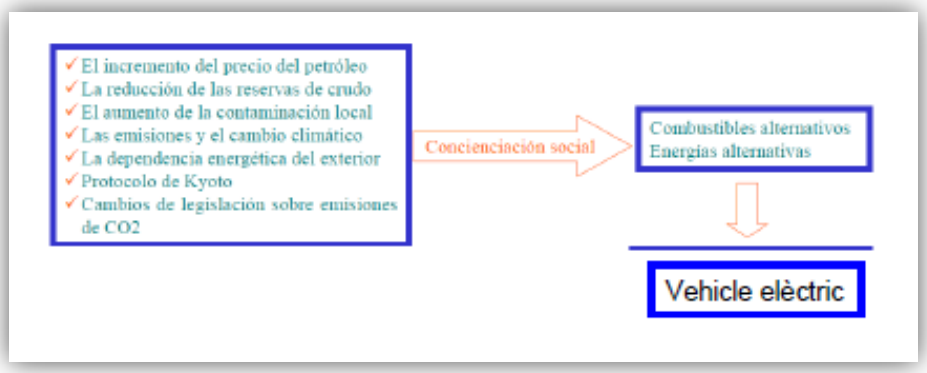


Figura 1. El vehicle elèctric com a alternativa.
(Font: www.motorpasionfuturo.com)

2.3. L'OPCIÓ DEL VEHICLE ELÈCTRIC

La idea de promoure la implantació massiva del vehicle elèctric ha ressorgit amb força en les successives crisis energètiques, difuminant-se quan la crisi passava. No obstant això, diversos desenvolupaments tecnològics que han millorat les característiques dels vehicles elèctrics, com la major capacitat i menor cost de les bateries, ha fet que es passi d'una fase de disseny de prototips a un potencial inici d'una fase comercial massiva. Aquest fet es pot constatar amb l'aparició de diferents models de vehicles elèctrics provinents d'alguns dels principals

fabricants automobilístics, i la previsió d'arribada de nous models en els propers mesos.

Com s'explicarà més endavant, el vehicle elèctric és possiblement la millor solució a la problemàtica del transport actual, ja que presenta molts avantatges respecte als vehicles amb motors tèrmics, i amés les seves característiques i prestacions permeten satisfer les necessitats de transport de la majoria dels usuaris, sobretot als nuclis urbans.

3. PARC AUTOMOBILÍSTIC ACTUAL

3.1. PROBLEMÀTICA

Com ja s'ha comentat, els vehicles que integren el parc automobilístic actual ofereixen un rendiment baix, si per això entenem el nivell d'aprofitament de l'energia que consumeixen. Això és degut en part, al pobre rendiment dels motors tèrmics en què es basen les seves motoritzacions, que es redueix encara més treballant a règims diferents a l'òptim, però que també es deu al sobredimensionat dels mateixos, la qual cosa fa que tinguin uns consums desorbitats de combustible a demandes de potències molt inferiors a aquelles per les quals han estat dissenyats.

Com és de suposar, aquest problema s'agreuja enormement a les ciutats, on la velocitat mitjana d'utilització dels vehicles és molt baixa, per la qual cosa els motors treballen en zones de molt mal rendiment. A més, són freqüents les frenades i les parades, períodes en els quals es consumeix una gran quantitat d'energia sense obtenir res a canvi.

Per determinar les característiques que tindrà el vehicle a dissenyar caldrà fixar-se en els vehicles que actualment s'ofereixen al mercat. L'oferta de vehicles d'ús principalment urbà, és molt amplia i ofereix diferents solucions per cobrir les necessitats dels ciutadans. A continuació es realitza una petita comparativa entre vehicles d'unes característiques molt concretes, com són els utilitaris de dimensions reduïdes pertanyents al segment A.

3.2. CARACTERÍSTIQUES DELS VEHICLES DEL SEGMENT A

El segment A és un segment d'automòbils que es situa per sota del segment B, però per sobre dels microcotxes. Aquests vehicles tenen una longitud entre 3,30m i 3,70m, i generalment tenen capacitat per a quatre adults, a diferència d'un microcotxe que només té capacitat per a dues persones. Tret d'escasses excepcions, la carrosseria és pràcticament sempre hatchback[3] o monovolum. Els motors tenen com a màxim quatre cilindres i poques vegades superen els 1,6 litres de cilindrada.

Per realitzar l'estudi[4] s'han escollit versions bàsiques de gasolina, amb potències properes als 50kW (68CV). Com es podrà observar a continuació, les

[3] *Hatchback – Disseny d'automòbil que consisteix en una cabina o àrea per a passatgers amb un espai de càrrega (maleter) integrat, al qual es té accés mitjançant una porta posterior.*

[4] *Estudi realitzat a partir d'informacions del web* http://www.km77.com/.

prestacions es mouen sempre en valors força modestos. Les dades recollides es mostren a l'annex 1.

3.2.1. VELOCITAT MÀXIMA

Les velocitats màximes d'aquests vehicles oscil·len entre els 160 km/h del VW Up, Seat Mii i Fiat 500, i els 145km/h (autolimitada) del Smart, amb una velocitat màxima mitjana de 156km/h. De totes maneres, ja que el vehicle objecte d'aquest projecte és de concepció purament urbana, la velocitat màxima no es considera un factor determinant. La següent figura mostra els valors obtinguts dels vehicles analitzats.

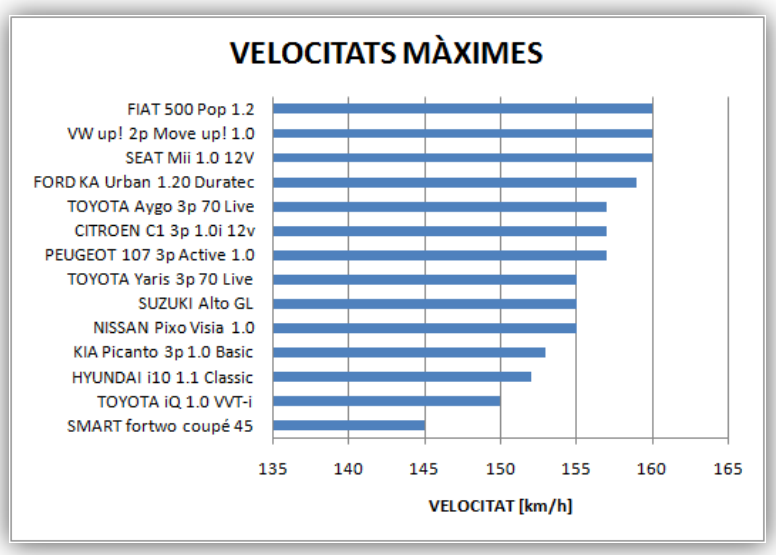


Figura 2. Velocitats màximes vehicles segment A.
(Elaboració pròpia)

3.2.2. ACCELERACIÓ

Pel que fa al temps d'acceleració de 0 a 100km/h, tots els vehicles es mouen entre els 12,3 segons del Peugeot 107 i els 16,8 del Smart. L'acceleració mitjana és de 14,3 segons. Encara que tampoc es vulgui sol·licitar una gran capacitat d'acceleració al vehicle a dissenyar, si que es considerarà un aspecte a tenir en compte, per tal de permetre realitzar incorporacions a una via ràpida amb unes bones condicions de seguretat. Amés, es vol aprofitar les característiques dels motors elèctrics, que s'explicaran més endavant, per dotar al vehicle d'una bona acceleració. La següent figura mostra els valors obtinguts dels vehicles analitzats.

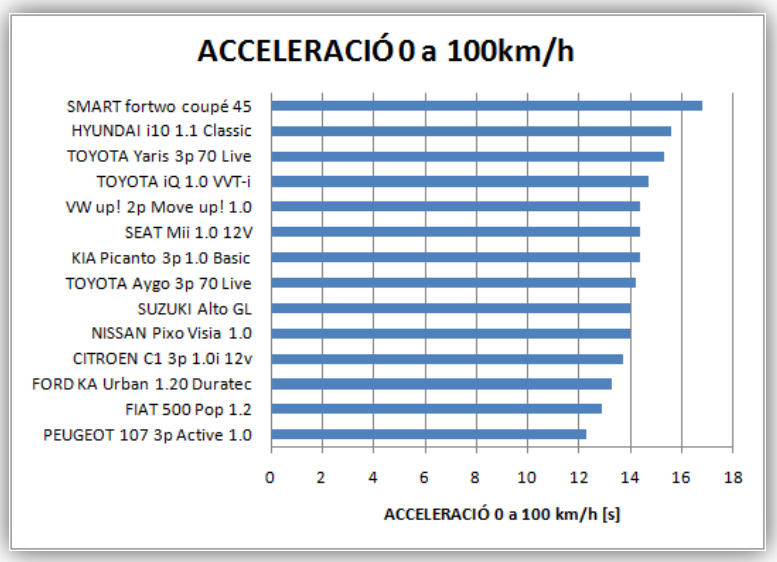


Figura 3. Dades d'acceleració dels vehicles del segment A.
(Elaboració pròpia)

3.2.3. CONSUM

En quant al consum urbà, els valors oscil·len entre els 6,4l/100 km del Fiat 500 i els 4,5l/100 km del Smart, amb un valor mitjà de consum de 5,5l/100 km. La següent figura mostra els valors obtinguts dels vehicles analitzats.

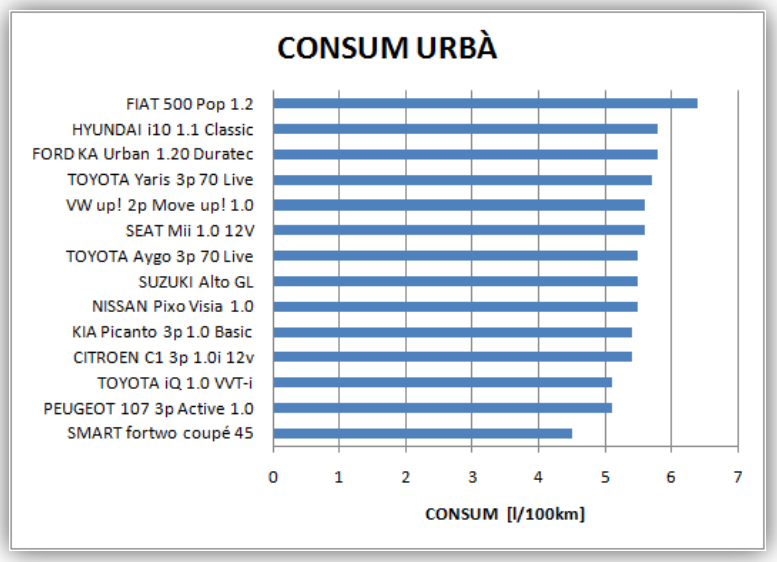


Figura 4. Consums urbans en l/100km dels vehicles del segment A.
(Elaboració pròpia)

Aquests valors no permeten establir una comparació amb el consum que pugui tenir un vehicle elèctric, ja que aquest no consumeix combustible durant el seu funcionament. Per aquest motiu es mostren els consums energètics expressats en kWh/100 km. Els valors de consum energètic s'han obtingut a partir del valor del PCI[5] de la gasolina, i segons la conversió següent:

$$\frac{litres}{100\ km} \cdot PCI\left[{}^{MJ}/_{litre}\right] \cdot \frac{1\ kWh}{3{,}6\ MJ} = \frac{kWh}{100\ km} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Amb un PCI de la gasolina de $32{,}18\ MJ/l$, els consums energètics són els següents:

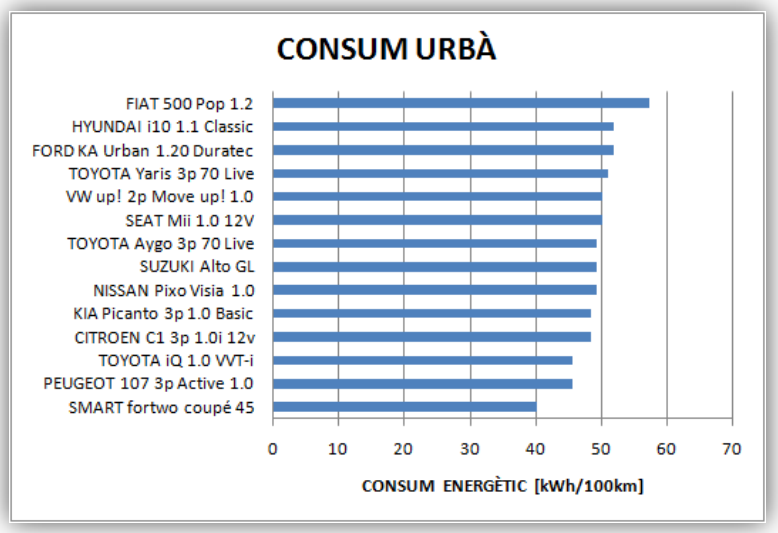


Figura 5. Consums urbans en kWh/100km dels vehicles del segment A. (Elaboració pròpia)

Els valors oscil·len entre els 40,2kWh/100 km del Smart i els 57,2kWh/100 km del Fiat 500, amb una mitjana de consum de 49,2kWh/100 km.

Aquests valors si que permeten obtenir una primera comparació entre el consum d'un vehicle amb motor tèrmic i el consum d'un elèctric. Per exemple, el Nissan Leaf, és un vehicle 100% elèctric amb una potència de 80kW, una longitud de 4,45m i un pes de 1600kg. Té una bateria de 24kWh que, segons dades de la pròpia marca[6], li permeten recórrer fins a 175km en cicle NEDC. A partir

[5] *PCI – Poder calorífic Inferior*

[6] (*www.nissan.es/**Leaf***)

d'aquestes dades, suposant que són reals i realitzant una petita aproximació, s'obté que el Leaf, tot i ser un vehicle molt més gran i pesat, i amb més potència que els vehicles estudiats en aquest apartat, té un consum energètic de 13,7kWh/100 km, que és un valor molt inferior a la mitjana de 49,2kWh/100km.

Aquesta dada dóna una primera idea de la diferència d'eficiència energètica existent entre els vehicles amb motor de combustió i els vehicles elèctrics. Aquest és un motiu prou important, juntament amb molts d'altres, per pensar que els vehicles elèctrics poden ser l'alternativa immediata als automòbils convencionals.

4. DETERMINACIÓ DE LES ESPECIFICACIONS DESITJADES

4.1. CARACTERÍSTIQUES DE LA MOBILITAT URBANA.

L'èxit en la implantació de qualsevol tipus de solució en la societat actual, radica en identificar i conèixer amb exactitud quines són les necessitats i preferències dels usuaris en aquell àmbit on es pretén innovar.

En el cas que ens ocupa, és important tenir informació sobre els hàbits dels ciutadans respecte a la mobilitat urbana i més concretament respecte a la mobilitat amb vehicle privat. En el cas d'estudi, les dades d'interès són:

- Nombre de quilòmetres diaris recorreguts per persona.
- Nombre de desplaçaments realitzats per dia i per persona.
- Velocitat mitjana durant el desplaçament.
- Nombre de passatgers per trajecte.
- Equipatge transportat per trajecte.

Aquesta informació permetria conèixer amb exactitud els aspectes més importants a tenir en compte alhora d'adaptar la nostra proposta a les necessitats dels usuaris, garantint-ne la seva acceptació.

4.1.1. SITUACIÓ ACTUAL

Segons l'informe anual del Ministeri de Foment sobre l'any 2008 (2), presentat al desembre de 2008, el parc espanyol de vehicles ascendia a 31 milions, és a dir, aproximadament dos vehicles per cada tres espanyols. Un 71,8% del parc de vehicles està format per turismes, seguit a molta distància per motocicletes, camions i furgonetes, un 13,4% per a tots dos.

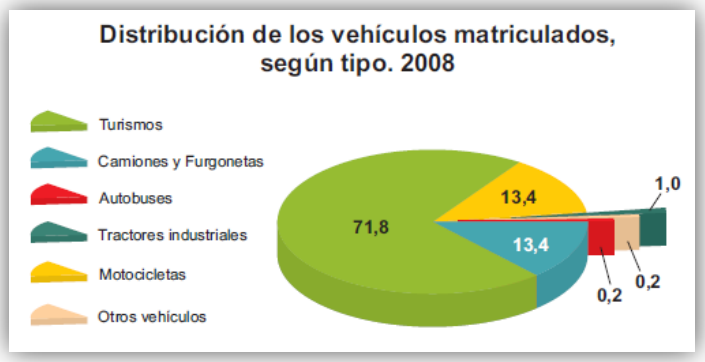


Figura 6. Distribució dels vehicles matriculats segons tipus (any 2008). (Font: Ministeri de Foment any 2008)

Segons dades del "*Anuario Estadístico*" (3) de l'any 2010, la distribució de velocitats de vehicles lleugers a les carreteres estatals convencionals (excloent autopistes i autovies) al 2010, indica que el 57,09% dels vehicles van circular a menys de 80km/h i el 87,7% ho va fer per sota de 100 km/h.

8. Tráfico
7.12. Distribución de velocidades de vehículos ligeros en la red de carreteras del Estado. Carreteras convencionales

AÑOS	< 50 km/h	51 a 80 km/h	81 a 100 km/h	101 a 120 km/h	121 a 140 km/h	> 140 km/h
2003	(2)	52,47	30,17	12,34	3,70	1,31
2004	(2)	55,92	28,82	11,24	3,21	0,80
2005	(2)	53,05	30,21	11,83	3,62	1,28
2006	20,11	40,80	27,09	9,32	2,09	0,59
2007	13,57	43,64	30,33	9,94	2,06	0,45
2008	11,80	52,40	26,26	7,35	1,78	0,41
2009 (1)	7,40	48,49	31,88	9,92	1,98	0,33
2010 (2)	7,96	49,13	30,61	9,38	2,48	0,44

Fuente: Subdirección General de Explotación y Gestión de Red. D. G. de Carreteras. M.º de Fomento.
(1) En 2009 se han tomado velocidades en carreteras convencionales a 219 millones de vehículos en 635 estaciones durante 1.074.908 horas.
(2) En 2010 se han tomado velocidades en carreteras convencionales a 434 millones de vehículos en 6664 estaciones durante 1.408.856 horas.
(*) De 2002 a 2005 los vehículos que circularon a menos de 50 km/h están acumulados en el intervalo siguiente (< 80 km/h).

Figura 7. Distribució de velocitats a les carreteres espanyoles els darrers anys. (Font: Ministeri de Foment any 2010)

A les àrees metropolitanes aquestes velocitats baixen considerablement. Per posar un exemple representatiu, a la ciutat de Madrid la velocitat mitjana al 2008 es va situar als 24,5km/h.

4.1.2. DISTÀNCIES RECORREGUDES

Un resum compilat per "*Eurostat"* (4) al 2007, derivat de les últimes enquestes realitzades a diferents països mostra que la gent, a la majoria dels països realitza una mitjana de 3 desplaçaments al dia amb una distància recorreguda que es oscil·la entre 30 i 40km tenint en compte tots els tipus de transport. La majoria d'aquests quilòmetres són recorreguts amb cotxe privat.

A l'EU-25, prop de 460 milions de ciutadans viatgen una mitjana de 27 km diaris amb cotxe. Per posar l'exemple d'un país concret, al 2002/03, més de tres quarts dels recorreguts amb cotxe al Regne Unit, van realitzar menys de 16km de distància, mentre que el 93% van ser inferiors a 40km. D'això es desprèn clarament que els vehicles elèctrics són tècnicament capaços de satisfer la majoria dels requisits de mobilitat personal, que actualment es realitzen amb vehicles de combustió.

Encara que no es disposa de la dada de distàncies mitjanes diàries recorregudes a Espanya, és de suposar que són fins i tot inferiors que a la resta d'Europa, atenent a la dada del temps mitjà empleat per trajecte, que és inferior al de la mitjana europea.

4.1.3. MITJANS DE TRANSPORT

El desplaçament a peu i el desplaçament amb cotxe o moto es mostren com el principal mitjà de transport setmanal (un 46 i un 42% respectivament). Entre aquells que impliquen algun mode mecànic, el cotxe és el mitjà més utilitzat (78%). El tercer lloc és per a l'autobús urbà i el metro, amb un 6. Altres mitjans de transport, l'autobús interurbà i el tren, són, en aquest ordre, la resta de formes utilitzades.

4.1.4. CONCLUSIONS

A partir de les dades presentades als apartats anteriors, i també tenint en compte les conclusions que s'obtenen en valors mitjans segons el "*Grupo de Investigación en Transporte y Logística*" (5), les característiques de la mobilitat en zones urbanes, resumint a grans trets, són les següents:

- La mitjana de quilòmetres realitzats diàriament per persona, varia en funció de l'estudi i de la zona urbana, però difícilment es superen els 60km.
- La velocitat mitjana es considera propera als 50km/h.
- El nombre de passatgers per trajecte és proper a 2, i l'ocupació del maleter no arriba al 30% de la seva capacitat total.

Aquestes conclusions, tot i ser molt generals, indiquen que el 90% dels trajectes es podrien realitzar amb automòbils de petites dimensions i amb una autonomia inferior als 100km és a dir, aquests trajectes estarien especialment indicats per a automòbils elèctrics, ja que compleixen totes aquestes premisses i a més tenen una eficiència energètica superior a l'automòbil convencional, de manera que suposaria un important estalvi energètic i reduiria de forma important les emissions contaminants en zones urbanes. El 10% dels trajectes restants, correspondria a trajectes realitzats a les perifèries de les ciutats, sortides de cap de setmana o vacances i viatges de llarga distància.

4.2. CONCEPTE DE VEHICLE

El concepte de vehicle a dissenyar, atenent a les informacions recollides, és un automòbil 100% elèctric de dimensions reduïdes amb capacitat per a dos ocupants i que disposi d'un petit maleter. Aquest vehicle estarà destinat a ús

principalment urbà, però tindrà unes prestacions suficients com per desplaçar-se per carretera i autopista de forma poc freqüent.

El disseny exterior ha de resultar atractiu i es pretén que tingui una línea de disseny similar als vehicles actuals, sense presencia de formes futuristes que generin escepticisme en els usuaris a l'hora d'adquirir-lo.

4.3. ESPECIFICACIONS DE DISSENY

Per tant, les especificacions de disseny del vehicle són les següents:

- Vehicle 100% elèctric.
- Longitud màxima inferior als 3,5m.
- Pes en ordre de marxa al voltant dels 750kg.
- Autonomia en cicle NEDC propera als 200km.
- Capacitat per a dos ocupants.
- Velocitat màxima limitada a 120km/h.
- Acceleració de 0 a 100km/h en un temps inferior als 15 s.
- Capacitat per superar pendents de fins al 25%.

Amés de totes aquestes característiques tècniques, el vehicle incorporarà tots els sistemes auxiliars elèctrics i electrònics habituals en un automòbil convencional per garantir el confort dels usuaris com són la climatització, la direcció assistida, radio,etc.

4.4. DESTINATARI

Amb aquesta proposta de vehicle, es vol introduir una nova opció a la oferta existent de vehicles de dimensions reduïdes. L'augment de l'ús d'aquests vehicles obeeix a un canvi de mentalitat que sembla que s'està començant a desenvolupar en països asiàtics, com el Japó o la China, on la densitat de població és molt elevada. Aquest "canvi de mentalitat" consisteix en prioritzar l'ús de vehicles adaptats a les necessitats de cada usuari, d'aquesta manera si una persona acostuma a realitzar un trajecte en solitari, no és necessari realitzar-lo amb un vehicle amb capacitat per a 4 o més persones, sinó que utilitzant un vehicle petit per a dues persones satisfaria la seva necessitat i seria molt més eficient.

Aquesta filosofia, també es podria incentivar per part de les administracions, amb la introducció de carrils tipus VAO[7] a les carreteres i vies d'accés a zones

[7] *VAO - Vehicles d'Alta Ocupació*

urbanes, on els vehicles monoplaça o biplaça, tindrien una ocupació del 50%, en cas d'un únic ocupant o del 100% amb dos ocupants.

Com ja s'ha indicat amb anterioritat, aquest vehicle aniria destinat a usuaris particulars que realitzin la majoria dels seus trajectes per zones urbanes i que esporàdicament circulin per vies ràpides. També podria ser un vehicle útil per a diferents serveis públics com podrien ser:

- Ús per part de les autoritats en tasques de vigilància (urbana, de trànsit, etc.).
- Vehicle per a la mobilitat de càrrecs intermedis a les administracions municipals.
- Ús per part del personal de les pistes dels aeroports.
- Taxis de baixa ocupació (només oferirien una plaça).

5. EL VEHICLE ELÈCTRIC

5.1. HISTÒRIA

Els inicis.

Els cotxes elèctrics no neixen en aquests dies com a solució als nostres problemes mediambientals, el cotxe elèctric va ser un dels primers automòbils a desenvolupar-se, fins al punt que van existir petits vehicles elèctrics antecessors fins i tot al motor de quatre temps sobre el qual Rudolf Diesel[8] i Karl Friedrich Benz[9] van basar l'automòbil actual.

Però per conèixer com va ser el naixement del vehicle elèctric, ens hem de remuntar al segle XIX. Les investigacions sobre electromagnetisme van avançar amb rapidesa i una de les seves primeres aplicacions pràctiques va ser la de motoritzar vehicles.

Al vapor, que no aconseguia substituir al cotxe de cavalls, li va sortir un competidor nou. Després dels primers experiments de Jedlik (1828) i Thomas Davenport (1835), trobem el primer vehicle elèctric que data del 1838, quan Robert Davidson va aconseguir moure una locomotora a 6 km/h sense utilitzar carbó ni vapor.

Entre 1832 i 1839 Robert Anderson va inventar el primer carruatge de tracció elèctrica, amb pila d'energia no recarregable. Les primeres bateries recarregables van aparèixer al 1880.

Al 1900 els cotxes elèctrics eren els que més es venien, molt més que no pas els de vapor o gasolina. De fet, al 1899 un cotxe elèctric, "*La Jamais Contente*", va superar per primera vegada els 100km/h i va instaurar un rècord de velocitat.

Figura 8. La Jamais Contente, 1899.

[8] *Rudolf Diesel – Considerat l'inventor del motor diesel al 1892..*

[9] *Karl Friedrich Benz - Considerat com un dels inventors de l'automòbil a finals del segle XIX.*

Els primers cotxes de gasolina eren molt contaminants, bruts, sorollosos, requerien gasolina (no era fàcil comprar-la al principi), calia canviar de marxa molt rudimentàriament, calia arrencar-los amb manovella i en qualsevol lloc eren susceptibles de fallar.

El cotxe elèctric triomfava per la seva simplicitat, fiabilitat, suavitat de marxa, sense canvi de marxes ni manovella, no feien soroll, eren veloços, l'autonomia era raonable i el seu cost era suportable per a la burgesia i les classes altes, que van ser els primers usuaris d'automòbils.

No obstant això, l'arribada del motor d'arrencada al 1912, Henry Ford[10] va inventar la producció en massa mecanitzada, la gasolina va assolir un preu molt popular, es van començar a obrir carreteres al tràfic i llavors l'autonomia va passar a ser una característica molt valorada, a més del preu. Això va fer que el motor de combustió suposés una opció més atractiva per a la propulsió d'automòbils i el cotxe de gasolina va acabar guanyant el pols als elèctrics.

L'era de l'oblit.

Fins a mitjans dels 60, els cotxes elèctrics gairebé van desaparèixer. Als anys 60-70, més per motius ecologistes que per una altra cosa, van començar a aparèixer alguns models al sector industrial, com el carret de golf elèctric i petits cotxes urbans.

La crisi del petroli del 1973 va ser el detonant per a la seva posterior reaparició, forçant als fabricants de cotxes convencionals a millorar la seva eficiència mentre es buscaven alternatives al petroli, una matèria prima d'origen estranger que podia tombar l'economia occidental si començava a escassejar o s'encaria.

Exceptuant prototips, models anecdòtics i vehicles industrials, cal anar-se'n fins al 1990, quan General Motors presenta el "*Impact*" al Saló de Los Angeles, que va ser el precursor del cotxe elèctric més famós de la història: el GM Experimental Vehicle 1 (EV-1).

[10] *Henry Ford - fundador de la companyia Ford Motor Company i pare de les cadenes de producció modernes.*

Figura 9. GM EV-1, 1996.

Nou intent de popularitzar els cotxes elèctrics.

Algunes iniciatives legislatives que exigien vehicles de zero emissions, van impulsar a les grans marques automobilístiques a investigar en aquest camp, mentre que alhora lluitaven als tribunals en contra d'aquestes lleis. L'estat de Califòrnia, el més contaminat d'EUA, va ser el pioner amb el seu "*Zero Emission Mandate*" (1990), que tindria efecte a partir de 1998.

Els grans fabricants es van apressar a posar a les carreteres californianes cotxes d'emissions zero per poder complir amb la Llei de l'estat. A més del EV-1 van aparèixer altres vehicles amb prestacions raonablement bones com el Toyota RAV4 EV, Ford Think, Nissan Altra EV entre d'altres.

Aquests cotxes oferien una autonomia suficient pel 90% dels desplaçaments habituals de la població, les seves prestacions eren ja adequades i van despertar una continguda expectació. Però els fabricants, van evitar fer publicitat a aquests vehicles i es van acabar sortint amb la seva, aconseguint rebaixar les exigències de la Llei, i van ser autoritzats a canviar cotxes d'emissió zero per cotxes de baixes emissions.

Diversos interessos van acabar amb el cotxe elèctric, tal i com es mostra al documental "*Who killed the electric car?*" (2006). La indústria petroliera va pressionar molt per crear un clima desfavorable contra aquests cotxes.

El cotxe elèctric no interessava perquè hi havia "pocs clients", havien de mantenir recanvis per a unes centenes o milers d'unitats, no requerien manteniment ni generaven diners a la postvenda, suposava invertir molts diners en I+D i sortia molt més rendible vendre SUV's[11] a una població que, en realitat

11 SUV - Sport Utility Vehicle (Vehicle esportiu utilitari)

no els necessitava. La majoria dels cotxes elèctrics que s'havien venut, van ser reclamats pels fabricants, deshabilitats o directament destruïts.

Els vehicles elèctrics gairebé van desaparèixer… però els últims esdeveniments econòmics i la creixent mentalitat ecològica ha aconseguit evitar la pressió del lobby del petroli. De manera que sembla que aquest cop, i per tercera vegada a la història, el cotxe elèctric torna a ressorgir però en aquesta ocasió, ve per quedar-se.

5.2. TIPUS DE VEHICLES ELÈCTRICS

5.2.1. VEHICLES ELÈCTRICS DE BATERIES (BEV[12])

Es tracta de l'únic vehicle 100% elèctric, que es compon essencialment d'una bateria elèctrica per a l'emmagatzematge d'energia, un motor elèctric i un sistema electrònic de control. Normalment la bateria es recarrega de la xarxa elèctrica a través d'un endoll i una unitat de càrrega de bateria (carregador), que pot portar-se a bord o integrat al punt de recàrrega. El controlador normalment controla la potència subministrada al motor, i per tant la velocitat del vehicle, endavant i enrere. En general, convé fer ús del fre regeneratiu, tant per recuperar l'energia com per utilitzar-lo com a una forma de frenada sense fricció.

5.2.2. VEHICLES ELÈCTRICS HÍBRIDS (HEV[13])

Un vehicle híbrid té dos o més fonts d'energia, i disposa d'un gran nombre de variants possibles. Els tipus més comuns de vehicles híbrids combinen un motor de combustió interna (MCI) amb una bateria, un motor elèctric i un generador. Hi ha dos tipus bàsics de vehicles híbrids, segons la configuració i disposició dels seus components, com són l'híbrid sèrie i l'híbrid paral·lel.

---

[12] *BEV - **Battery Electric Vehicle***

[13] *HEV - Hybrid Electric Vehicle*

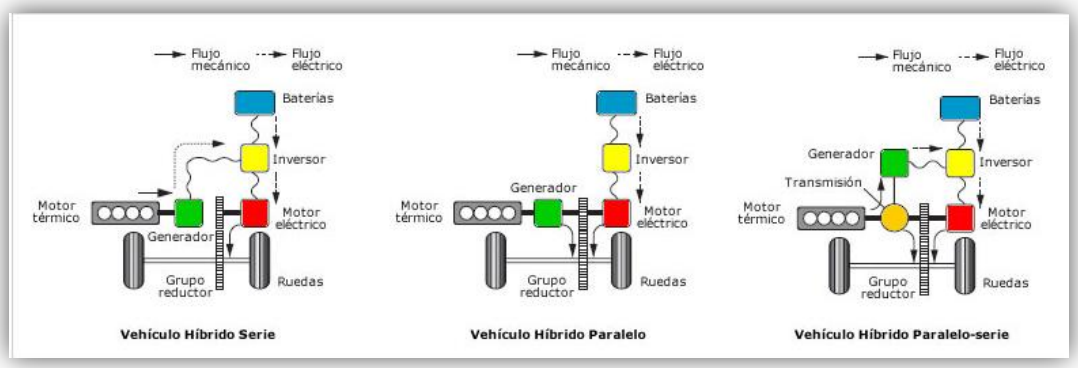


Figura 10. Tipus de vehicles híbrids segons la configuració i disposició dels elements. (Font: http://feelmotor.wordpress.com)

- En l'híbrid sèrie, el vehicle és impulsat per un o més motors elèctrics que s'alimenten tant de la bateria com del generador, accionat pel motor de combustió, o de tots dos.
- En l'híbrid en paral·lel, el vehicle podrà ser accionat pel motor de combustió directament a través d'un sistema de transmissió a les rodes, o per un o més motors elèctrics, o pel motor elèctric i el motor de combustió alhora.

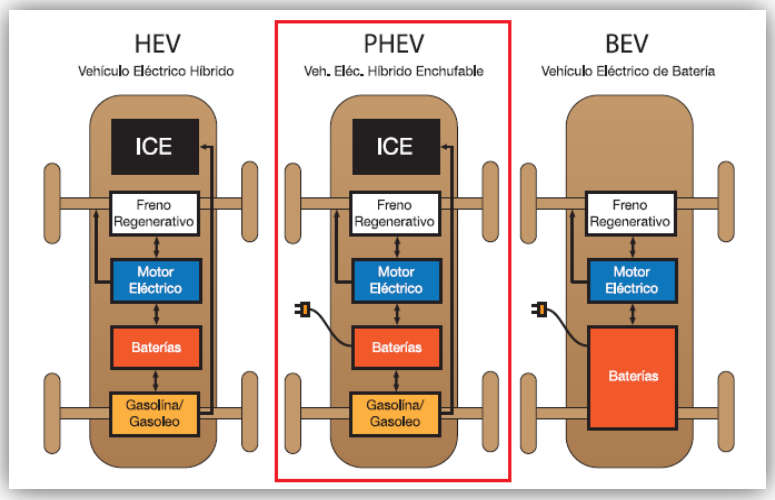
En ambdós casos, tant en sèrie com en paral·lel, la bateria pot ser recarregada pel motor i el generador mentre el vehicle es mou, per la qual cosa aquesta necessita ser tan gran com en un BEV. A més, tots dos tipus permeten la frenada regenerativa, podent el motor elèctric treballar com un generador i al mateix temps frenar el vehicle i carregar la bateria. L'híbrid en paral·lel, té un àmbit d'aplicació molt ampli.

5.2.3. VEHICLES HÍBRIDS ENDOLLABLES (PHEV[14])

Es tracta d'un vehicle híbrid, les bateries del qual poden ser recarregades endollant el vehicle a una font externa d'energia elèctrica. El vehicle híbrid endollable comparteix les característiques d'un vehicle híbrid elèctric tradicional i d'un vehicle elèctric, ja que està dotat d'un motor de combustió interna (gasolina o dièsel) i d'un motor elèctric acompanyat d'un paquet de bateries que es poden recarregar endollant el vehicle al subministrament elèctric.

[14] *PHEV – P**lug-in Hybrid Electric Vehicle***

Normalment en aquest tipus de vehicle, el motor de combustió és més petit que el que porten els cotxes convencionals i fins i tot els cotxes híbrids, ja que la seva principal funció és proporcionar una extensió del rang d'autonomia.



V

Figura 11. Tipus de vehicles elèctrics segons la font d'energia per a la propulsió. (Font: WWF ADENA)

5.2.4. VEHICLES ELÈCTRICS AMB CEL·LES DE COMBUSTIBLE

El principi bàsic de funcionament dels vehicles elèctrics que utilitzen cel·les de combustible, és similar al vehicle 100% elèctric, però amb una pila de combustible o una bateria de metall-aire que substitueix a la bateria elèctrica recarregable. Les piles de combustible més utilitzades funcionen amb hidrogen, que s'emmagatzema a bord en forma líquida, que s'obté a partir d'un combustible com el metanol.

5.3. TECNOLOGIES ACTUALS

Un vehicle de bateries és una màquina elèctrica molt senzilla que està formada bàsicament per un motor elèctric, una bateria per emmagatzemar l'energia i un controlador electrònic que regula la gestió d'aquesta energia. Un altre element important en aquesta tecnologia és el carregador de la bateria que pot trobar-se integrat al vehicle o pot ser un sistema extern. En quant a la transmissió, pot incorporar canvi de marxes, tot i que generalment es prescindeix d'aquest element i la transmissió és directa a través del diferencial.

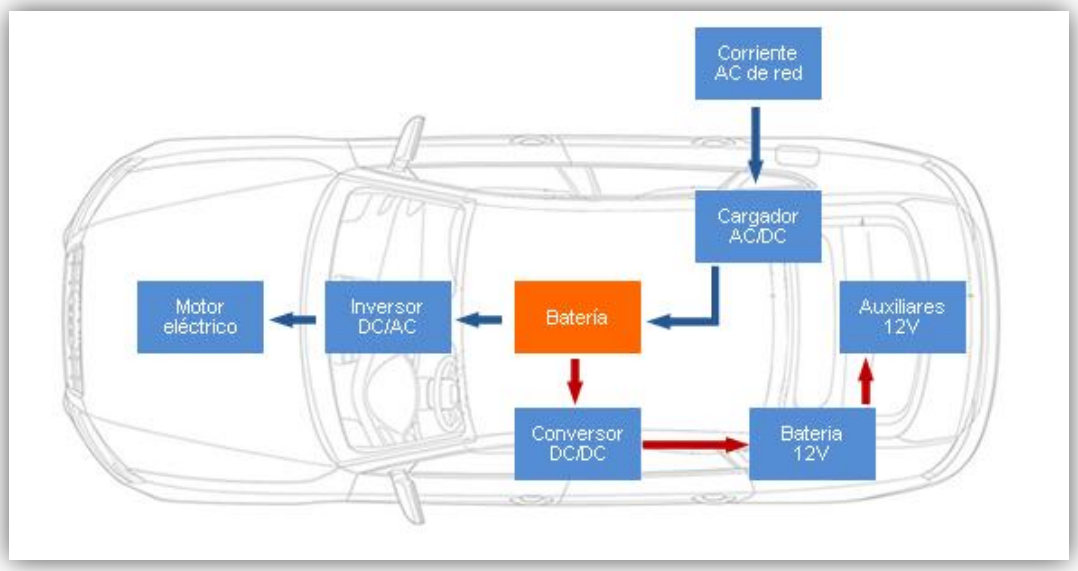


Figura 12. Esquema dels components principals d'un VE.
(Font: www.motorpasionfuturo.com)

El principal component en el desenvolupament dels vehicles elèctrics és la bateria. Encara que recentment s'ha produït un important desenvolupament tecnològic en aquest camp, encara segueixen apareixent reptes en relació a la millora i desenvolupament de la tecnologia, sobretot pel que fa a l'emmagatzematge d'energia. A curt termini, s'espera que el desenvolupament i extensió dels vehicles híbrids tinguin un important paper en el desenvolupament de vehicles purament elèctrics propulsats només per bateries.

Actualment, la tecnologia de les bateries ofereix una menor autonomia que els motors de combustió interna a un cost més elevat.

5.3.1. BATERIES

En els últims anys, el desenvolupament tecnològic referent a les bateries i a sistemes d'emmagatzematge energètic han creat el clima ideal per al desenvolupament mundial dels vehicles de bateries. Els materials més utilitzats en les bateries recarregable de vehicles elèctrics són el plom-àcid, níquel-cadmi, níquel-hidrur metàl·lic, ió-liti i menys comuns com el zinc-aire o les sals foses. Les bateries de liti-fosfat de ferro (LiFePO) són actualment una de les variants de bateries més prometedores a causa del seu baix pes, alta densitat d'energia i la eradicació dels problemes sobtats que han afectat a algunes bateries de ions de liti d'ordinadors portàtils.

5.3.1.1. Plom-àcid

Tradicionalment, la majoria dels vehicles elèctrics han utilitzat bateries de plom-àcid, a causa de la seva tecnologia madura, alta disponibilitat i baix cost. Igual que totes les bateries, aquestes tenen un impacte ambiental a través de la seva construcció, ús, disposició i reciclat. Per contra, les taxes de reciclat arriben fins al 95% als Estats Units. Les bateries de plom, de cicles profunds, són cares i tenen una vida més curta que el propi vehicle, en general necessiten un reemplaçament cada 3 anys.

Les bateries de plom en aplicacions per a vehicles elèctrics suposen una part important (25% -50%) de la massa final del vehicle. Igual que totes les bateries, tenen una densitat d'energia significativament menor que els combustibles derivats del petroli, en aquest cas de 30-40Wh/kg. El rendiment del 70-75% i la capacitat d'emmagatzematge de l'actual generació de bateries de plom-àcid de cicle profund disminueix amb les baixes temperatures, i l'energia desviada per activar un circuit d'escalfament redueix l'eficiència resultant finalment en un rendiment de fins i tot el 40%. Els avanços recents en l'eficiència de la bateria, capacitat, materials, seguretat, toxicitat i durabilitat, és probable que permetin millorar aquestes característiques que s'aplicarien al cotxe elèctric.

La càrrega i funcionament de les bateries, produeix l'emissió d'hidrogen, oxigen i sofre, que s'absorbeix de forma natural, i que normalment són inofensius per a la salut si el lloc està ben ventilat. Les bateries de plom van alimentar a cotxes elèctrics moderns tals com les versions originals dels EV1 i el RAV4 EV.

5.3.1.2. Niquel-hidrur metàl·lic

Les bateries de níquel-hidrur metàl·lic es consideren ara una tecnologia relativament madura. Encara que siguin menys eficients (60-70%) en la càrrega i descàrrega que fins i tot les de plom-àcid, compten amb una densitat d'energia de 30-80 Wh/kg, força més alta que les de plom-àcid. Quan s'utilitzen correctament, les bateries de níquel-hidrur metàl·lic poden tenir vides excepcionalment llargues, com s'ha demostrat en el seu ús en vehicles híbrids i els RAV4 EVs que encara funcionen bé després de 160.000km i més d'una dècada de servei.

Com a desavantatges es troben la baixa eficiència, una elevada auto-descàrrega, cicles de càrrega molt meticulosos, i les pobres prestacions en ambients freds.

5.3.1.3. Ions de liti

Les bateries d'ió-liti, liti-polímer i similars, àmpliament conegudes a través del seu ús en ordinadors portàtils i electrònica de consum, dominen el grup més recent en el desenvolupament de sistemes per a vehicles elèctrics. La química tradicional del ió-liti implica un càtode d'òxid de liti-cobalt i un ànode de grafit. D'això es deriven unes densitats d'energia remarcables de fins a 180 Wh/kg, bones densitats de potència i rendiments de càrrega i descàrrega d'entre el 80 i el 90%.

Els principals desavantatges del ió-liti són cicles de vida curts (de centenars a uns milers de cicles de càrrega) i la degradació significativa amb l'edat. El càtode és també una mica més tòxic. A més, les bateries d'ió-liti tradicionals es poden incendiar si es perforen o es carreguen incorrectament. La maduresa d'aquesta tecnologia és moderada. Per exemple, el Tesla Roadster utilitza làmines de bateries tradicionals de ió-liti com les dels portàtils que poden ser reemplaçades individualment, segons sigui necessari.

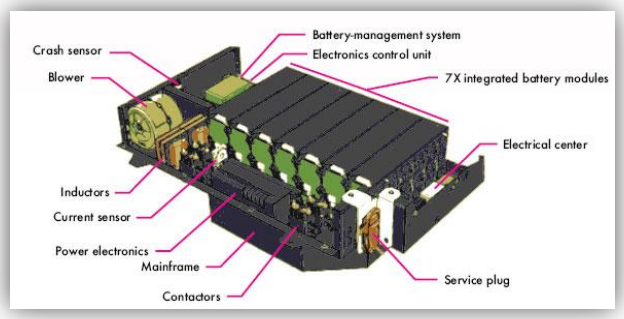


Figura 13. Bateria de A123 amb 7 cel·les de liti-fosfat de ferro i els seus controls electrònics. (Font: A123 Systems)

La majoria de vehicles elèctrics actuals estan utilitzant les noves variacions desenvolupades en la química del ió-liti que sacrifica la densitat d'energia per millorar altres característiques com subministrar densitats de potència extremes, resistència al foc, menors riscos de contaminació ambiental, càrregues molt ràpides (en qüestió de minuts) i cicles de vida més llargs. Aquestes variants han demostrat que tenen una vida útil molt més llarga. Un exemple és el fabricant "*A123 Systems*" que espera que la seva bateria de liti-fosfat de ferro (LiFePO) duri almenys 10 anys i més de 7000 cicles de càrrega.

5.3.1.4. Liti-fosfat de ferro (LiFePO4)

La bateria de càtode LiFePO4 millora la velocitat de càrrega i descàrrega, així com la capacitat d'emmagatzematge d'energia. I degut a que deriven de la tecnologia de ió-liti, les bateries de LiFePO4 hereten molts dels avantatges i desavantatges de la química del ió-liti. Per exemple, les bateries de LiFePO4 poden proporcionar una corrent de descàrrega major.

A més, el LiFePO4 és un material catòdic intrínsecament més segur que el LiCoO2[15]. L'enllaç Fe-PO és més fort que l'enllaç Co-O, per la qual cosa quan s'abusa de la bateria (en curtcircuit, sobreescalfament, etc.), els àtoms d'oxigen són molt més difícils d'eliminar.

Els trencaments poden succeir sota calor extrema, en general més de 800°C. No obstant això, les bateries LiFePO4 no tenen les mateixes fuites tèrmiques que les bateries de LiCoO2. Les piles LiFePO4 també presenten les millors característiques de seguretat, amb capacitat de fins a 2000 cicles de càrrega/descarrega.

La tecnologia del LiFePO4 té alguns desavantatges en comparació amb altres tecnologies de ió-liti. La tensió mínima de descàrrega de la cèl·lula és de 2,8V, la tensió de treball és de 3,0 a 3,3V i la tensió màxima de càrrega és de 3,6V. Convencionalment la càrrega de les bateries de ions es realitza a una tensió de 4,2V. A més, la densitat d'energia del LiFePO4 és menor que el de les bateries de LiCoO2, per la qual cosa requereix un major desenvolupament per millorar aquesta característica. No obstant això, les bateries LiFePO4 tenen un cost potencialment més baix que els seus homòlegs basats en el liti.

5.3.1.5. Ultracondensadors i supercondensadors

Els condensadors emmagatzemen energia com a camp elèctric, la qual cosa els fa més eficients que les bateries estàndards, que obtenen la seva energia a partir de reaccions químiques. Els supercondensadors són piles d'emmagatzematge basades en condensadors que subministren esclats ràpids i massius d'energia instantània aportant una embranzida extra en l'acceleració i quan es pugen desnivells.

No obstant això, els supercondensadors necessiten molt més espai que les bateries per emmagatzemar la mateixa càrrega. La seva capacitat per emmagatzemar l'energia molt més ràpid que les bateries també els fa especialment adequats per a aplicacions de frenat regeneratiu. La nova

[15] *Liti-Cobalt Òxid (LiCoO2) - Material utilitzat al càtode de les bateries de liti tradicionals.*

tecnologia en desenvolupament podria ser els ultracondensadors amb alta densitat d'energia, suficient com per ser un substitut atractiu per a les bateries en els vehicles elèctrics i híbrids, amb càrrega ràpida i estabilitat enfront els canvis de temperatura.

Actualment aquest tipus de solució s'utilitza en autocars híbrids, ja que els cicles de conducció que realitzen, amb continues arrancades i frenades, permeten treure molt bon partit a la frenada regenerativa, aconseguint estalvis de consum molt interessants.

Figura 14. Ultracondensadors Maxwell MC. (Font: Maxwell MC)

Tipo	Energia/ peso	Tensión por elemento (V)	Duración (número de recargas)	Tiempo de carga	Auto-descarga por mes (% del total)
Li-Po	100-130 Wh/kg	3,7 V	5000	1h-1,5h	10%
Li-ion	110-160 Wh/kg	3,16 V	4000	2h-4h	25 %
Ni-Mh	60-120 Wh/kg	1,25 V	1000	2h-4h *	20 %
Plomo	30-50 Wh/kg	2 V	1000	8-16h	5 %
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1,25 V	500	10-14h *	30%

Figura 15. Comparativa de prestacions de bateries.
(Font: *Electric Vehicle Technology Explained*)

5.3.2. MOTORS ELÈCTRICS

Donades les característiques dels vehicles elèctrics, resulta imprescindible utilitzar motors elèctrics que tinguin un elevat rendiment, alta densitat de potència, bona capacitat de sobrecàrrega durant breus períodes, alt parell motor a baixes velocitats, rang de velocitats de funcionament ampli i, tot això, a un cost raonable.

Els motors més utilitzats són el motor de corrent continu, el motor d'inducció amb rotor en "jaula de ardilla", el motor síncron d'imants permanents (existeixen diverses tipologies en funció de la disposició dels imants) i el motor de reluctància variable.

Cadascuna d'aquestes alternatives presenta avantatges i desavantatges, destacant en cada cas algun dels aspectes relacionats amb les prestacions generals del vehicle. Per tant, cap de les alternatives aconsegueix imposar-se com la més recomanable. D'altra banda, el motor ha d'anar d'acord amb l'accionament en el seu conjunt, és a dir, el convertidor estàtic a emprar, la capacitat de les bateries i el nivell de tensió disponible, entre altres variables.

Les característiques que han de tenir els motors emprats per a la propulsió de vehicles elèctrics es poden resumir de la següent manera:

- Alta densitat de potència amb la finalitat de minimitzar el volum ocupat pels motors i reduir el pes addicional que ha de transportar el vehicle.
- Elevat parell motor a baixes velocitats amb la finalitat d'aconseguir una ràpida acceleració i disposar d'alta capacitat per superar pendents.
- Ampli rang de variació de velocitat.
- Baixa inèrcia per aconseguir respostes ràpides davant canvis de velocitat.
- Alt rendiment en tot el rang de velocitats amb la finalitat de poder superar requeriments addicionals durant breus períodes.
- Cost raonable.

Per a aquest tipus d'aplicacions resulta convenient utilitzar accionaments que permetin estendre la velocitat per sobre del valor nominal. D'aquesta manera, el motor pot funcionar fins a la seva velocitat nominal proporcionant parell motor constant i a partir d'aquesta velocitat, reduir el parell mantenint la potència constant. Aquesta manera de funcionament es pot aconseguir amb motors de corrent continu i amb motors d'inducció mitjançant el debilitament de camp a partir de la velocitat nominal.

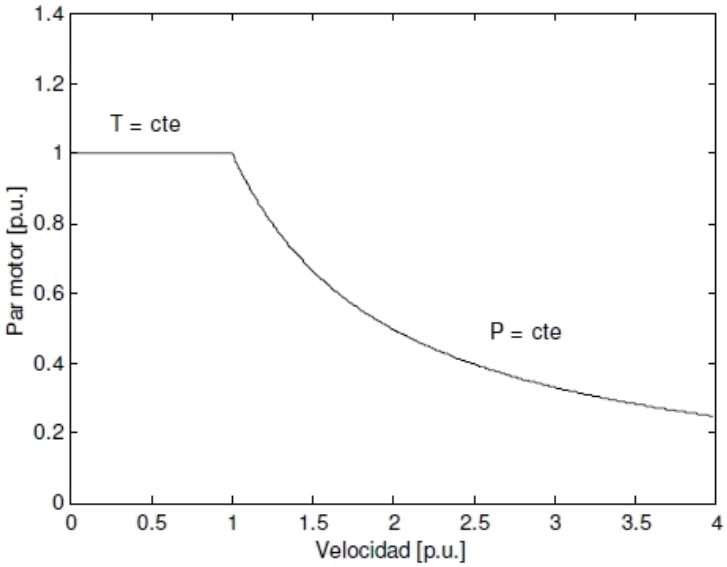


Figura 16. Corba característica de funcionament d'un motor elèctric. (Font: Wikipedia)

L'article de Mounir Zeraoulia(6), presenta una descripció de les màquines elèctriques utilitzades per a tracció en els models comercials més reconeguts de vehicles híbrids. A continuació es fa una breu referència de cadascun d'aquests motors des d'una perspectiva orientada cap a la seva utilització en vehicles elèctrics.

5.3.2.1. Motor de corrent continu (DC)

Si bé ofereix un control de velocitat simple i s'adapta perfectament a les característiques de parell motor indicades en la figura , el seu rendiment és molt baix i la presència del commutador limita la capacitat de sobrecàrrega i la velocitat màxima i exigeix major atenció en el manteniment.

5.3.2.2. Motor d'inducció (IM)

Els motors d'inducció amb "jaula de ardilla" presenten avantatges tals com robustesa, baix manteniment, alta fiabilitat i baix cost. Accionats mitjançant inversors amb control vectorial, ofereixen bones prestacions per a velocitat variable i poden funcionar amb debilitament de camp a la zona de potència constant.

Les tècniques de control de velocitat d'aquests motors han aconseguit un nivell de maduració tal que les fa fiables. No obstant això, aquests motors presenten baix rendiment i baix factor de potència, i per tant un baix factor d'utilització de

l'inversor. A mesura que s'incrementa la seva velocitat per sobre de la nominal, el rendiment es redueix encara més.

5.3.2.3. Motor síncron d'imants permanents (PM)

A partir del desenvolupament d'imants d'alta energia com els obtinguts mitjançant aliatges de neodimi, ferro i bor (NdFeB) és possible construir motors síncrons en els quals l'excitació s'obté del magnetisme romanent d'imants col·locats a la superfície del rotor. D'aquesta manera s'eviten els anells de fricció i les pèrdues al rotor. Gràcies a això últim, aquests motors presenten millor rendiment que els d'inducció. El factor de potència també és alt i d'aquesta manera s'aconsegueix un bon factor d'utilització de l'inversor.

L'inconvenient d'aquests motors radica en la dificultat per produir debilitament de camp i estendre la velocitat per sobre de la nominal. En efecte, per afeblir el camp cal desmagnetitzar els imants aplicant una component de camp d'estator en sentit contrari. Això només pot fer-se per a nivells de desmagnetització molt limitats degut a que una desmagnetització elevada pot tornar-se irreversible i inutilitzar els imants.

5.3.2.4. Motors de reluctància commutada (SRM)

Els motors de reluctància variable o commutada presenten una construcció molt simple i robusta. El control és relativament simple i és possible disposar d'una regió àmplia de funcionament a potència constant. Els seus desavantatges radiquen en un elevat arrissat en el parell motor, elevat nivell de soroll, vibracions i interferència electromagnètica, desavantatges que resulten decisives per a la seva implementació en vehicles elèctrics.

5.3.2.5. Comparativa

En aquest article es realitza una comparativa entre les quatre alternatives citades. Per a això assignen un puntuació entre 0 i 5 en diferents aspectes que són considerats crucials per a aplicacions en vehicles elèctrics. A la taula següent es mostren els resultats de la comparació:

Propulsion Systems / *Characteristics*	DC	IM	PM	SRM
Power Density	2.5	3.5	5	3.5
Efficiency	2.5	3.5	5	3.5
Controllability	5	5	4	3
Reliability	3	5	4	5
Technological maturity	5	5	4	4
Cost	4	5	3	4
Σ Total	**22**	**27**	**25**	**23**

Figura 17. Avaluació d'alternatives per a la propulsió de vehicles elèctrics. (Font: IEEE)

D'aquesta comparativa es desprèn que, clarament, els motors d'inducció i els de imants permanents presenten avantatges enfront de la resta. Es conclou, en tant, que aquestes dues alternatives són les més pertinents per a l'aplicació requerida.

Pel que fa a la disposició dels motors, variades alternatives han estat implementades. Entre elles, motors individuals en cada roda o bé un únic motor amb transmissió diferencial a l'eix motriu, d'igual forma que els vehicles convencionals.

5.3.2.6. Motors "In wheel"

La tecnologia dels motors en roda, no està encara molt desenvolupada per a la seva aplicació en automòbils però sí ho està en altres sectors de la indústria. Promet ser una solució que simplifica enormement la transmissió i permet alliberar espai per a altres elements com les bateries.

5.3.3. REGULACIÓ I CONTROL

L'inversor controla i subministra la potència al motor del vehicle elèctric. En el cas d'incorporar frenada regenerativa, quan aquesta actua l'inversor recull l'energia del motor que funciona com a generador i l'envia a la bateria. La funció principal d'un inversor és canviar un voltatge d'entrada de corrent continu a un voltatge simètric de sortida de corrent altern, amb la magnitud i freqüència desitjada per l'usuari o el dissenyador.

Un inversor simple consta d'un oscil·lador que controla un transistor, el qual s'utilitza per interrompre el corrent entrant i generar una ona quadrada. Aquesta ona quadrada alimenta a un transformador que suavitza la seva forma, fent-la semblar una mica més a una ona sinusoïdal i produint el voltatge de sortida necessari. Les formes d'ona de sortida del voltatge d'un inversor ideal haurien de ser sinusoïdals. Una bona tècnica per aconseguir això és utilitzar el control PWM[16] aconseguint que la component principal sinusoïdal sigui molt més gran que els harmònics d'ordre superior.

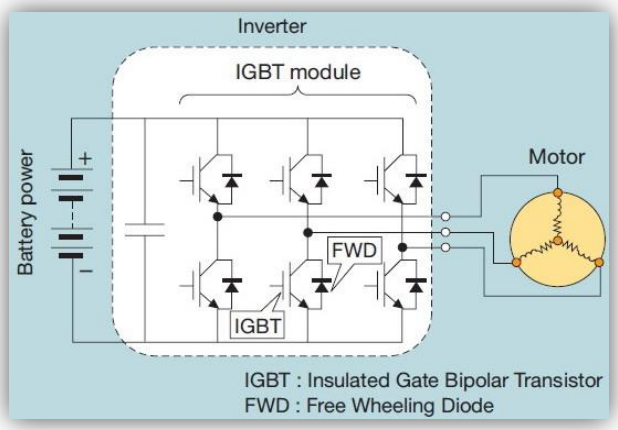


Figura 18. Esquema bàsic d'un inversor. (Font: Wikipedia)

Els inversors més moderns han començat a utilitzar formes més avançades de transistors o dispositius similars, com els tiristors, els triacs o els IGBTs. Els inversors més eficients utilitzen sistemes electrònics complexos per tractar d'arribar a una ona que simuli raonablement a una ona sinusoïdal a l'entrada del transformador, en comptes de dependre d'aquest per suavitzar l'ona.

En portar un motor a alta velocitat, la modulació de l'ample de pols (PWM) ha de ser ajustada a una freqüència de commutació alta per garantir la capacitat de control, en resposta a l'augment de la freqüència sinusoïdal del corrent del motor. En canvi, en una regió de baixa velocitat, on existeix un elevat flux de corrent elèctric, el motor no requereix una elevada freqüència de commutació. Malgrat conduir durant curts períodes a altes velocitats, l'inversor d'un vehicle elèctric exigeix que la freqüència de commutació sigui sempre compatible amb la regió d'alta velocitat.

Actualment la tècnica més avançada disponible es basa en la utilització del control vectorial. Les altes freqüències PWM (>16kHz), permeten un control

[16] *PWM - Pulse Width Modulation.*

precís i dinàmic per als motors d'alta velocitat amb pèrdues d'inductància petita, molt complicat amb inversors convencionals. A continuació es fa una breu referència als principals factors que determinen les característiques dels inversors per a vehicles elèctrics.

- Control del parell, velocitat i control de la potència.
- Alt rendiment en la conversió d'energia.
- Compactes i lleugers.
- Silenciós i baix EMI[17].
- Regulació ràpida i suau (PWM d'alta freqüència).
- Sense degradació de l'aïllament del motor.
- Funcionament per a alta velocitat.
- Gestió tèrmica.
- Bus de comunicacions compatible (CAN[18]).
- Ampli rang de tensions d'entrada (p. ex. 42 a 700VDC).
- Àmplia gamma de nivells de potència disponibles.
- Compatibilitat amb el motor del vehicle elèctric.

Els inversors també s'utilitzen per convertir el corrent continu generat pels panells solars fotovoltaics, aerogeneradors o bateries, etc., en corrent altern i d'aquesta manera poder ser injectats a la xarxa elèctrica o usats en instal·lacions elèctriques aïllades.

5.3.4. FRENADA REGENERATIVA

La frenada regenerativa en un vehicle de bateries és la conversió de l'energia cinètica del vehicle en energia química emmagatzemada a la bateria, on pot ser utilitzada més tard per propulsar el vehicle. Es tracta de frenada, ja que també serveix per frenar el vehicle, i és regenerativa perquè l'energia és emmagatzemada de nou a la bateria, on pot ser utilitzada de nou.

L'energia cinètica emmagatzemada en un vehicle en moviment es relaciona amb la massa i la velocitat del vehicle per l'equació següent:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \qquad \text{(Eq. 2)}$$

17 EMI - Electromagnetic Interference.

18 CAN - Controller Area Network.

D'aquesta forma, si el vehicle és dues vegades més pesat tindrà el doble d'energia cinètica i si es mou el doble de ràpid tindrà quatre vegades més energia cinètica. Cada vegada que el vehicle frena, l'energia cinètica emmagatzemada al vehicle ha de ser eliminada.

Hi ha sempre una certa energia consumida per la resistència al rodolament, la fricció mecànica i la resistència aerodinàmica del vehicle. Aquests fragments de consum energètic es perden per l'escalfament de l'asfalt de la carretera, l'aire circumdant, i de diverses peces en moviment del vehicle, i amés una part de l'energia cinètica, es converteix en calor per les pastilles de fre degut a la fricció amb els discos de fre, quan el mecanisme és accionat. En un vehicle amb frenada regenerativa, es recupera part de l'energia que en altres casos es perd en forma de calor.

La quantitat d'energia que es pot recuperar depèn de com i per on es circula. Les eficiències de conversió d'energia electromecànica són bastant elevades. El major problema és la pèrdua aerodinàmica a alta velocitat i la fricció per fregament dels pneumàtics. Aquests dos factors actuen per frenar el cotxe però l'energia dissipada no pot ser recuperada. Cal recordar també que, encara que de la bateria a les rodes, l'eficiència de conversió és bastant bona (fins a un 80%), l'energia fa un cercle complet de tornada a la bateria, sent convertida en dues ocasions amb un rendiment net màxim de 80% x 80% = 64%.

A causa de la simplicitat de la part mòbil del motor d'inducció, els vehicles elèctrics no experimenten el tradicional fre motor originat per la compressió en els motors de combustió interna. En canvi, els algorismes avançats en el controlador del motor li donen un control complet del parell del motor, tant per a l'acceleració com per a la frenada regenerativa, prenent com a senyal la posició del pedal de l'accelerador.

El motor i el controlador poden regular el parell a qualsevol velocitat d'operació, inclòs a 0km/h. Això significa que podem regenerar l'energia del vehicle fins a estar completament parats. No obstant això, a la pràctica, l'energia cinètica d'un automòbil que es mou lentament és tan baixa que, en cas de frenada, molt poca energia es recuperaria a la bateria. De fet, l'últim tram de frenat del vehicle genera una quantitat tan petita d'energia, que no permet cobrir les pèrdues fixes a l'inversor i al motor.

Hi ha una sèrie de restriccions alhora d'utilitzar la frenada regenerativa:

- ***Seguretat:*** El parell negatiu que s'aplica a les rodes pot causar que el vehicle es torni inestable. Els últims desenvolupaments inclouen el control

de tracció per limitar la regeneració si les rodes posteriors comencen a lliscar.

- ***Frenada d'emergència.*** En cas de frenada d'emergència la quantitat d'energia cinètica que es necessita dissipar és tan gran que el sistema motor - inversor - bateries no la podrien absorbir.
- ***Bateries al 100% de càrrega:*** La frenada regenerativa està limitada quan les bateries estan completament carregades. Degut a que una càrrega addicional de frenada regenerativa, faria que el voltatge d'una bateria completa s'elevés per sobre d'un nivell segur produint danys en la mateixa.

5.3.5. RECÀRREGA

El procediment més recomanat per recarregar les bateries de ió-liti implica mantenir un corrent constant seguit d'una tensió constant. Amb aquest mètode, la major part de l'energia es carrega a un corrent constant i per acabar s'omple utilitzant una tensió constant de tall. La capacitat de càrrega final varia entre els fabricants, però generalment el tall es produeix amb la bateria al 100% de l'estat de càrrega. A continuació s'expliquen tres tipus bàsics de sistemes de càrrega que s'empren en els vehicles elèctrics.

El mètode més senzill utilitza un corrent estàndard 230VAC monofàsic i uns 15 o 20 A, que és un corrent contractat típicament disponible en edificis residencials i comercials. A causa d'aquesta petita quantitat de potència (màxim d'1,44kW) produeix prolongats temps de càrrega, i està destinat exclusivament a petits vehicles i no pas com la solució definitiva de càrrega. Aquest tipus es considera important per la quantitat de punts de recarrega disponibles, ja que són la majoria dels endolls domèstics i es podrien emprar per a una situació d'emergència, fins i tot si això significa esperar diverses hores per obtenir la recàrrega.

Malgrat això es recomana realitzar una instal·lació especial ja que la instal·lació tradicional no podria suportar mantenir la intensitat de corrent juntament amb altres aparells o fins i tot amb un altre segon vehicle, produint una sobrecàrrega i l'accionament dels sistemes de protecció. Generalment els vehicles incorporen un carregador d'aquest tipus, que juntament amb un cable estàndard permeten realitzar la càrrega en pràcticament qualsevol endoll.

El següent tipus és més idoni per a un carregador de bateries de vehicles elèctrics i suposa un voltatge de 230VAC monofàsic i corrent d'uns 40-60A. Aquest sistema proporciona potències més elevades i permet escurçar considerablement el temps de càrrega del vehicle, a entre 6 i 8 hores. A més

d'un carregador extern que pot ser portàtil, s'ha de condicionar la instal·lació elèctrica del local o punt de recarrega perquè no es produeixin sobrecàrregues que impliquin situacions de risc. Una potència major ha de ser contractada a la companyia elèctrica.

El tercer mètode o mètode de càrrega ràpida s'empra per a aplicacions comercials i públiques i està destinat a funcionar com una estació de servei. Generalment utilitza un sistema que empra corrent trifàsic a 480VAC. A la pràctica, les dimensions dels equips varien entre els 60 i els 150kW, i si els vehicles ho permeten poden recarregar parcialment la bateria en poques hores o fins i tot minuts. Aquest tipus de carregadors són els empleats per recarregar vehicles elèctrics amb bateries de gran capacitat com furgonetes, camions o esportius.

5.3.6. TRANSMISSIÓ

En aquests vehicles, els canvis de marxa no solen ser necessaris, només es sol disposar d'un conjunt reductor d' aproximadament 1:5 a 1:10, depenent del pes i de l'ús del vehicle. Malgrat tot, en alguns vehicles pot ser necessari estendre el rang on el motor ofereix les seves millors prestacions a costa de sacrificar la simplicitat de construcció i la manipulació d'una transmissió directa.

5.4. COTXES ELÈCTRICS DISPONIBLES AL MERCAT

En un primer moment, l'oferta de vehicles elèctrics es reduïa a cotxes de petites dimensions, destinats a cobrir unes necessitats bàsiques de mobilitat a un preu reduït, fabricats per petites empreses que, veient el poc interès que les grans marques automobilístiques mostraven en aquest sector, han vist en el cotxe elèctric una gran oportunitat de negoci i de creixement.

El pioner dels elèctrics, el Reva, arribat al 2008, és un vehicle dissenyat per ser utilitzat com a automòbil urbà de distancies curtes. Amb una longitud de 2,6m, i un pes de 750 kg, presenta una velocitat màxima de 80km/h, més propera a un quadricicle que a un automòbil convencional, i una autonomia de 120km.

Figura 19. REVA

El Think City, és un cotxe elèctric pertanyent al segment A, que va arribar al mercat al 2008. Va equipat amb un motor d'inducció de 34kW, una bateria de ZEBRA ($NaAlCl_4$) amb 24kWh de capacitat i un pes en ordre de marxa de 1358kg. En aquest cas, es tracta d'un vehicle que ofereix unes prestacions que l'acosten més als cotxes convencionals, amb una velocitat màxima de 105km/h i una autonomia de 210km, que el fan capaç de circular per vies ràpides, i té un consum energètic d'uns 18kWh als 100km.

Actualment, les coses han canviat i de sobte el vehicle elèctric a despertat un gran interès a la majoria dels grans fabricants de cotxes del món. Aquest fet ha provocat un degoteig constant de nous models elèctrics que continuarà durant aquests propers anys.

Una mostra d'aquests models més actuals,serien el Mitsubishi i-Miev, que seguit dels seus germans bessons, el Citroën C_Zero i el Peugeot iOn, ofereixen un cotxe elèctric, per mides i prestacions, pensat per a un ambient clarament urbà. Amb un motor d'imans permanents de 47kW i unes bateries de Io-Liti de 16kWh, per a un pes total de 1195kg, en tots tres casos la velocitat màxima s'enfila fins als 130km/h i l'autonomia en cicle NEDC arriba als 150km per cada recàrrega. El consum energètic d'aquests models és d'uns 11kWh per cada 100km.

Els tres vehicles anteriors, juntament amb models com el Nissan Leaf o els Renault Zoe i Fluence ZE representen la primera fornada de models elèctrics provinents d'ambiciosos programes engegats per part dels grans fabricants.

El Leaf representa un model de major categoria amb un equipament molt complet. Incorpora un motor síncron de 80kW i unes bateries de 24kWh, té un pes de 1521kg i ofereix una autonomia de 175km i una velocitat màxima de 145km/h. El seu consum energètic és de 15kWh per cada 100km.

Figura 20. Nissan Leaf

Altres fabricants, han preferit llançar versions elèctriques dels seus models més representatius. Un exemple serien el Ford Focus Electric o el Smart ED. En el Focus Electric, s'ha substituït el motor tèrmic per un motor síncron de 100kW i disposa d'unes bateries de Ió-Liti de 23kWh, que li atorguen una autonomia de 160km. Té un pes total de 1674kg i un consum energètic de 15kWh als 100 km.

El Smart ED és una versió del Smart fortwo, que disposa d'un motor de 55kW amb unes bateries de Ió:liti de 17,6kWh per a un pes total de 975kg. Té una autonomia de 140km amb una velocitat màxima de 120km/h i un consum energètic de 13kWh per cada 100km.

Figura 21. Smart Electric Drive (ED)

El mercat també ofereix models esportius amb prestacions que no tenen res a envejar als esportius convencionals. El Tesla Roadster, que és considerat l'esportiu elèctric per excel·lència, incorpora un motor d'inducció de 185kW de potència i un paquet de bateries de Ió-Liti amb una capacitat de 53kWh, que estenen la seva autonomia fins als 393km. El Roadster arriba als 200km/h i té una passa de 0 a 100km/h en tan sols 4 segons. El pes total del conjunt és de 1265kg i té un consum energètic de 13,5kWh als 100km.

Una solució més extrema seria el Lightning GT, un superesportiu que demostra que els vehicles elèctrics també poden assolir prestacions equiparables a les dels superesportius convencionals més potents.

Figura 22. Lightning GT.

Aquest model està propulsat per quatre motors "in wheel" de 120kW de potència cadascun, que en total arriben als 480kW. El sistema de bateries que utilitza no ha estat facilitat però es coneix que té una autonomia d'uns 300km. Les seves prestacions són d'autèntic esportiu amb una velocitat màxima limitada a 210km/h i una acceleració de 0 a 100km/h en 4s. El pes total del vehicle és de 1850kg.

A l'annex 1 es mostra un recull de dades la majoria dels vehicles elèctrics disponibles actualment al mercat.

En conclusió, es pot afirmar que el mercat ofereix solucions interessants que representen una alternativa real als vehicles convencionals, però que alhora presenten barreres importants per a la seva extensió definitiva.

Una d'aquestes barreres, que possiblement és la més influent, és el preu d'aquests vehicles, ja que en la majoria de casos el preu de les bateries fa que l'import final s'acosti als 25.000€. Envers aquest punt, hi ha fabricants com Renault, que per rebaixar el preu dels vehicles, venen el cotxe i lloguen les bateries per una quota mensual durant uns anys determinats.

Un altre factor important és l'autonomia, ja que en vehicles de prestacions normals, difícilment es superen els 160km, i això sense tenir en compte que les homologacions es realitzen sense utilitzar els sistemes de climatització i d'altres sistemes auxiliars, fet que encara reduiria més l'autonomia final. Això juntament amb l'escassa presencia de punts de recàrrega a la xarxa de carreteres, genera una desconfiança en l'usuari que perjudica el desenvolupament del vehicle elèctric.

5.5. AVANTATGES I INCONVENIENTS DELS VEHÍCLES ELÈCTRICS

Els principals avantatges que presenten els vehicles elèctrics respecte als convencionals són els següents:

- El rendiment dels motors elèctrics és superior al 85%, mentre que en el cas dels motors tèrmics aquest no arriba al 30%. Això fa que l'eficiència energètica dels vehicles elèctrics com a unitat de transport, sigui superior a la dels vehicles convencionals.
- Els vehicles elèctrics no contaminen, si més no de forma local, ja que no generen emissions de gasos contaminants. Aquest aspecte és molt important per promoure l'ús d'aquests vehicles, en detriment dels vehicles amb motors tèrmics, en nuclis urbans, fet que milloraria la qualitat de l'aire que es respira a les ciutats i comportaria una millora en la qualitat de vida.
- Un altre avantatge important dels vehicles elèctrics, és que no generen contaminació acústica degut a que són pràcticament tan silenciosos com una bicicleta.
- El cost del kWh respecte al cost actual dels combustibles fòssils, fa que els vehicles elèctrics tinguin un cost per quilometratge molt més baix (2,55€/100km)[19] respecte als vehicles convencionals amb motors tèrmics (10,5€/100km)[20].
- El vehicle elèctric, al ser molt més simples i senzills que els vehicles amb motors de combustió, que tenen moltes més parts mòbils, presenten un menor risc d'averies, de manera que el cost de manteniment és molt inferior.

Tot i els múltiples avantatges que presenta el vehicle elèctric, també presenta inconvenients que dificulten l'electrificació definitiva del parc automobilístic. Els més significatius són els següents:

- Les bateries tenen una capacitat d'emmagatzematge d'energia molt inferior als combustibles fòssils. A més, presenten uns valors de densitat de potència i densitat d'energia relativament baixos que fan que per poder disposar de quantitats d'energia que permetin oferir una autonomia acceptable, són necessàries bateries amb unes dimensions i pes considerables. Aquest motiu fa que l'autonomia d'un vehicle elèctric sigui

[19] *Considerant un preu de 0,17€ per kWh i un consum energètic de 15kWh per cada 100km.*

[20] *Considerant un preu del combustible de 1,5€/l i un consum de 7l per cada 100km.*

molt inferior a la d'un vehicle convencional de les mateixes característiques.

- Actualment, amb un cost aproximat de 700-1000€/kWh, poder disposar de bateries que ofereixin una autonomia superior als 200km representa un cost molt elevat que fa que els vehicles elèctrics siguin molt més cars que els vehicles convencionals.
- Les bateries tenen una vida útil reduïda, que es veu afectada pels cicles de càrrega/descàrrega als que estan sotmeses.
- El temps de recàrrega és un altre inconvenient important a tenir en compte, ja que actualment en cap cas és inferior als 15-20 minuts respecte als 5 minuts que es necessiten per omplir el dipòsit d'un automòbil convencional.
- L'autonomia també es veu perjudicada per la poca presència de punts de recàrrega a la xarxa de carreteres, fet que impossibilita la opció de recórrer llargues distancies sense haver consultat prèviament la disponibilitat d'aquests punts al llarg del trajecte. En canvi, als nuclis urbans, la disponibilitat de punts de recàrrega és cada vegada més elevada.

6. MODELAT DEL BEV

En aquest apartat es desenvoluparà tot el procés que s'ha seguit per realitzar el modelat del vehicle elèctric. Aquest modelat té com a objectiu principal permetre la simulació de l'autonomia del vehicle i veure l'afectació que tenen els diferents canvis que es realitzen en alguns paràmetres del vehicle (massa, Cx, ratio de regeneració, etc.) així com la temperatura ambiental alhora de preveure la distància màxima que es podrà recórrer.

En aquest capítol es plantejaran les equacions que regeixen la dinàmica del vehicle i el funcionament de la bateria, i s'introduiran al programa Matlab-Simulink per tal de realitzar una simulació que permeti obtenir resultats amb bona precisió.

En primer lloc es defineix el model de la bateria, el qual permetrà simular-ne el funcionament en diferents condicions de treball i també permetrà reproduir l'efecte que produeix la temperatura en el seu rendiment. En segon lloc, es modelaran els paràmetres dinàmics del vehicle així com la seva capacitat d'acceleració. Una vegada obtingut això, com a entrada del sistema, s'aplicarà el cicle de conducció que es vol simular per tal d'obtenir l'autonomia del vehicle. La simulació també permetrà aplicar canvis als paràmetres del sistema i veure l'afectació que tenen sobre l'autonomia.

6.1. MODELAT DE LA BATERIA

La bateria és l'element més important d'un vehicle elèctric ja que actualment, la implementació d'aquests vehicles ve determinada per les prestacions que s'obtinguin d'aquesta. El model proposat emula una bateria real, partint de les característiques i paràmetres obtinguts a partir del model de bateria de les llibreries de Simulink. No s'ha utilitzat directament el model de bateria de les llibreries de Simulink perquè aquest no permet modelar l'efecte de la temperatura en el comportament de la bateria.

Per completar el model també s'han utilitzat dades reals de diferents fabricants de bateries existents al mercat.

El model aquí descrit és una versió del model proposat per Lijun Gao (7) per simular el comportament de les bateries de liti encara que permet simular bateries de qualsevol tecnologia. En aquest cas els paràmetres per configurar el model han estat obtinguts a partir de les dades tècniques proporcionades per

KOKAM[21], que és un fabricant de bateries de LiFePo. A més, també s'han emprat dades del model de bateria de la llibreria SimPowerSystems de Simulink, així com dades d'altres marques que fabriquen la mateixa tecnologia per així contrastar els valors.

El model s'ha implementat utilitzant Simulink i forma part del model de vehicle elèctric que es descriu al següent apartat.

6.1.1. CIRCUIT EQUIVALENT

El rendiment de les bateries depèn de variables, que en alguns casos són fàcils de mesurar, com són la seva temperatura i voltatge, i en altres casos no tan fàcilment mesurables com són la seva càrrega, la seva edat o la forma en què hagin estat tractades en el passat, és a dir l'estat de càrrega SOC (State of Charge) i l'estat de salut SOH (State of Health). Les toleràncies de fabricació i les variacions entre cel·les dins de la bateria també poden tenir un gran impacte en el rendiment final.

Aquest model presenta un nivell de detall que s'aproxima al funcionament real perquè utilitza les mesures experimentals més rellevants disponibles a les fulles tècniques dels fabricants. Aquestes dades són la caiguda de potencial als terminals de la bateria en funció de la càrrega aplicada i la caiguda de potencial degut a les variacions de temperatura.

El model considerat està format bàsicament per dos components:

- Un potencial d'equilibri E(t).
- Una resistència interna Ri.

L'esquema elèctric d'aquests components és el següent:

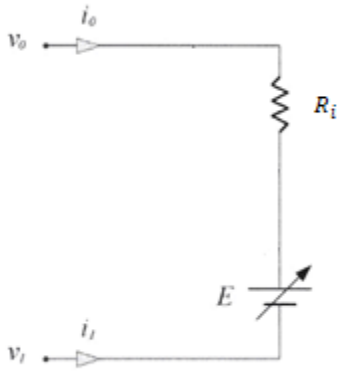


Figura 23. Circuit equivalent de la bateria. (Elaboració pròpia)

21 KOKAM – Fabricant de bateries (http://www.kokam.com/new/)

El potencial d'equilibri (voltatge de circuit obert) depèn de la temperatura i de la quantitat de material actiu disponible a la bateria, el qual s'especifica com a estat de descàrrega SOD. La capacitat de descàrrega depèn de la intensitat de descàrrega i de la temperatura. De manera que cal determinar una expressió per al potencial E(i,T,t).

En aquest model es segueixen 4 passos per modelar el potencial d'equilibri basat en dades experimentals:

- Primer es defineix una de les corbes de descàrrega de la bateria com a corba de referència. La corba de referència és la de descàrrega a 0,5C, ja que és la que s'espera que sigui més propera a la mitjana de descàrrega per al vehicle, obtenint així una millor precisió general. El potencial d'equilibri en funció de la profunditat de descàrrega s'obté excloent el potencial intern degut a les pèrdues a la resistència. S'escaneja aquesta corba obtenint una taula de punts de voltatge respecte estat de descàrrega SOD.
- A continuació, es pren com a intensitat de descàrrega (corrent aplicat) la de la corba de referència. La dependència del corrent amb l'estat de descàrrega ve modificat per un factor de descàrrega α(i), de manera que aquest factor per al corrent de referència és la unitat.
- Es pren com a temperatura de referència la de la corba de temperatura de referència. La dependència amb l'estat de descàrrega i amb la temperatura s'ajusta amb un factor de temperatura β(T) que és igual a la unitat per a la corba de referència.
- Finalment, s'utilitza un terme de correcció de potencial per compensar la variació del potencial d'equilibri induït pels canvis de temperatura a la intensitat de referència. Aquest terme és zero per a la temperatura de referència.

6.1.2. RELACIONS MATEMÀTIQUES

Les expressions per al potencial, el voltatge als terminals i l'estat de descàrrega, basats en les descripcions anteriors, vénen donats de la següent forma:

$$E[i(t),T(t),t] = v[i(t),T(t),t] - R_i \cdot i(t) \qquad \text{(Eq. 3)}$$

$$v[i(t),T(t),t] = f\left(SOD^k[i(t),T(t),t]\right) + \Delta E(T) \qquad \text{(Eq. 4)}$$

$$SOD^k[i(t),T(t),t] = \frac{1}{Q_r}\int_0^t \alpha[i(t)]\cdot\beta[T(t)]\cdot i(t)dt \qquad \text{(Eq. 5)}$$

On *f* representa la corba de potencial de referència obtinguda i on Q_r és la capacitat de la bateria referida al voltatge de tall per a la corba de referència. El mètode per determinar el factor de descàrrega per a la corba de descàrrega es mostra a la figura següent.

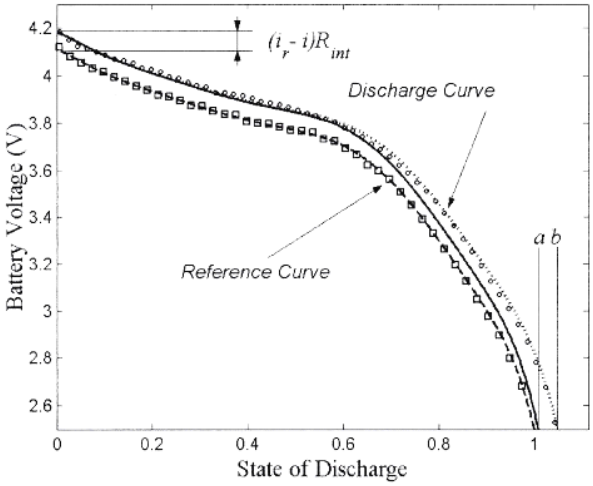


Figura 24. Determinació del factor de descàrrega α(i).
(Font: Valence LiFePo U1-XP).

La corba de referència indicada té un factor de descàrrega que és la unitat al voltatge de tall. La corba per la qual es calcula el factor de descàrrega té una capacitat de descàrrega major, igual a b. La corba representada per la línia sòlida va ser calculada a partir de la corba de referència, excloent les pèrdues a la resistència interna (desplaçant la corba cap amunt una distància igual a $(i_r - i)\cdot R_i$) on i_r és el corrent de descàrrega de la corba de referència i *i* és el corrent de la corba per la qual es busca el factor).

La profunditat de descàrrega per a la corba de referència és igual a *a*. El factor de descàrrega es defineix com:

$$\alpha(\boldsymbol{i}) = \frac{\boldsymbol{a}}{\boldsymbol{b}} \qquad \text{(Eq. 6)}$$

La línia obtinguda considerant les pèrdues internes i el factor de descàrrega s'ajusten a la corba real satisfactòriament. Es calcula el factor de descàrrega per a les diferents corbes de descàrrega proporcionades pel model de bateria de la

llibreria SimPowerSystems de Simulink. La següent gràfica mostra el valor del factor de descàrrega per a les diferents intensitats de descàrrega:

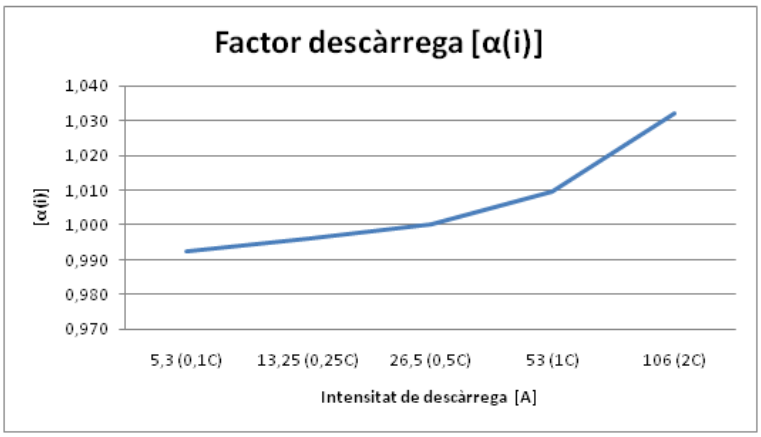


Figura 25. Factor de descàrrega α(i) en funció de la intensitat de descàrrega. (Elaboració pròpia)

Els factors de temperatura i el potencial de caiguda a causa de la temperatura són calculats seguint el mateix procediment.

En aquest cas, les dades corresponen a una intensitat de descàrrega determinada obtinguda a diferents temperatures. La corba de referència (25ºC) té un factor igual a 1. La corba per la qual es busca el nou factor de temperatura es representa amb quadrats (0ºC).

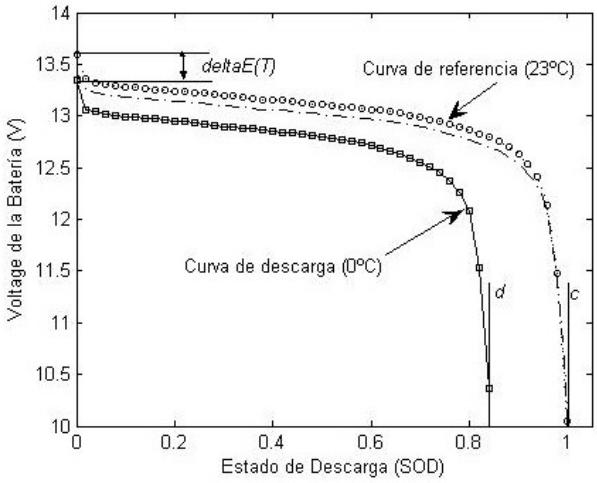


Figura 26. Determinació del factor de temperatura β(T). (Font: Valence LiFePo U1-XP).

El desplaçament vertical és la variació de potencial $\Delta E(T)$ que és funció de la temperatura i es calcula per a cada corba subministrada pel fabricant. La capacitat de descàrrega és c. El factor de temperatura es defineix com.

$$\boldsymbol{\beta(T) = \frac{c}{d}} \qquad \text{(Eq. 7)}$$

A continuació es mostren els factors de temperatura per a les corbes de descàrrega a diferents temperatures. Per obtenir aquests valors, s'ha utilitzat un model de bateria del fabricant KOKAM.

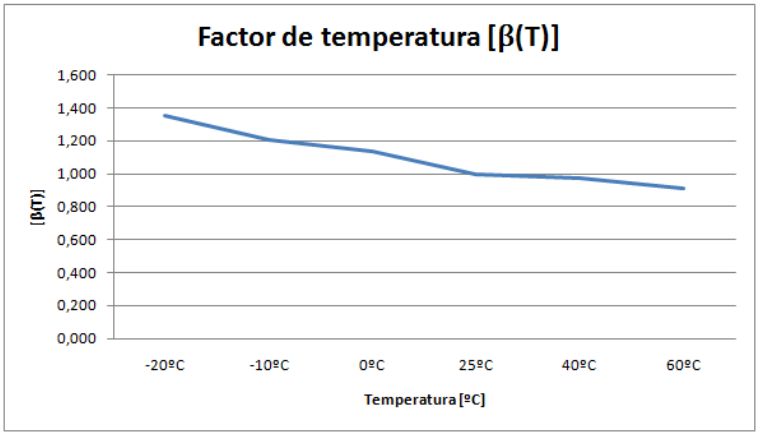


Figura 27. Factor de temperatura β(T) en funció de la temperatura de descàrrega. (Elaboració pròpia)

Els factors de caiguda de potencial de la bateria per a les diferents corbes de temperatura proporcionades pel mateix fabricant són els següents:

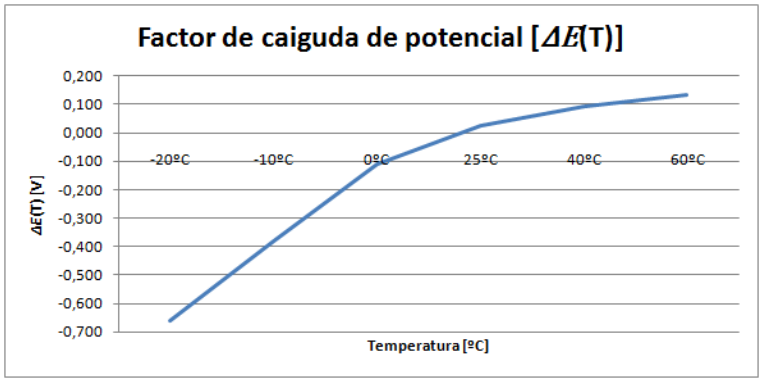


Figura 28. Factor de caiguda de potencial $\Delta E(T)$ en funció de la temperatura de descàrrega. (Elaboració pròpia)

6.1.3. MODEL SIMULINK DE LA BATERIA

Definits els factors anteriors, el model de bateria ja pot simular el seu comportament a partir dels principals paràmetres de funcionament com són la intensitat de descàrrega i la temperatura. Cal indicar que el factor de descàrrega per quan es descarrega la bateria és diferent que per quan es carrega. En aquest cas, per simplificar el model, es consideren iguals. El model de la bateria es mostra a continuació.

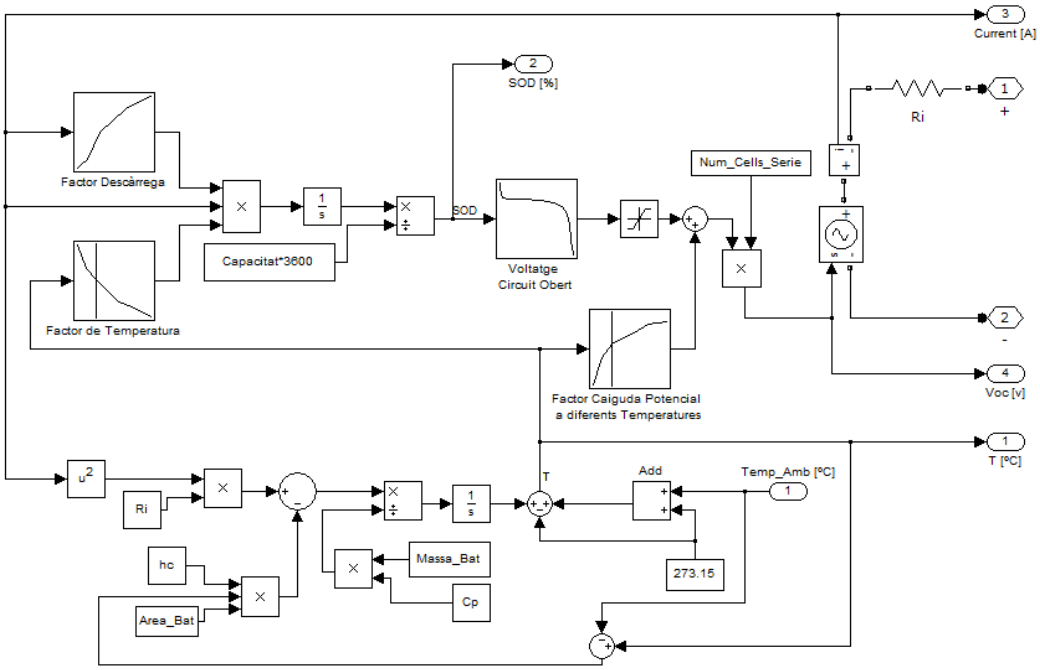


Figura 29. Vista general del model Simulink de la bateria. (Elaboració pròpia)

A la part dreta s'implementen els blocs que representen el circuit elèctric equivalent utilitzant elements de la llibreria SimPowerSystems de Simulink. Aquesta part està constituïda per la resistència interna i la font de corrent. Aquesta font està controlada pel circuit de control de l'esquerra. La font genera un potencial segons el bloc 'lookup' "Voltatge Circuit Obert" que conté els valors de la corba de referència i a la qual s'entra amb l'estat de descàrrega SOD.

L'estat de descàrrega s'obté de la relació de corrent consumit i corrent disponible, és a dir la capacitat de la bateria. El bloc integrador acumula el corrent que passa per la bateria, obtenint així l'energia consumida respecte a la capacitat, l'energia encara disponible.

Com s'ha vist, la intensitat consumida és major a major règim de descàrrega i a menor temperatura. Aquest efecte s'aconsegueix implementant dos blocs

'lookup' α(i) i β(T) que ajusten el corrent que circula per la bateria mitjançant el factor de descàrrega i en funció de la intensitat i de la temperatura respectivament. Amés, la temperatura també influeix en la caiguda de potencial. Un quart bloc 'lookup' interpola els valors de ΔE(T) obtinguts per a cada corba del fabricant, obtenint així la caiguda de potencial per a qualsevol temperatura de funcionament.

Els blocs inferiors del model corresponen al modelatge tèrmic de la bateria que es defineix a continuació. Com el potencial d'equilibri depèn de la temperatura, la temperatura de la bateria ha de ser calculada dinàmicament durant la simulació. La temperatura de la bateria augmenta a mesura que augmenta la intensitat que circula per ella i una part de la calor s'acumula a la massa de la bateria, mentre que l'altra part es dissipa a l'exterior, depenent de les característiques de transferència de la superfície exposada.

El canvi de temperatura de la bateria està governat pel balanç d'energia que es descriu a continuació:

$$m_{BAT} \cdot c_p \cdot \frac{dT(t)}{dt} = i(t)^2 \cdot R_i - h_c \cdot A_{BAT} \cdot [T(t) - T_{amb}] \qquad \text{(Eq. 8)}$$

El calor generat a causa de possibles canvis de fase a l'interior de la bateria ha estat ignorat.

6.1.4. VALIDACIÓ DEL MODEL

Per validar el funcionament de la bateria, s'ha realitzat un model que integra la bateria de LiFePO. Aquest model permet variar la intensitat que es fa circular per la bateria així com la temperatura ambient instantània.

Un control evita que la bateria es descarregui per sobre del 100% de la seva capacitat. També es registra l'energia elèctrica transferida per la bateria per comparar amb l'energia dissipada a l'interior de la mateixa.

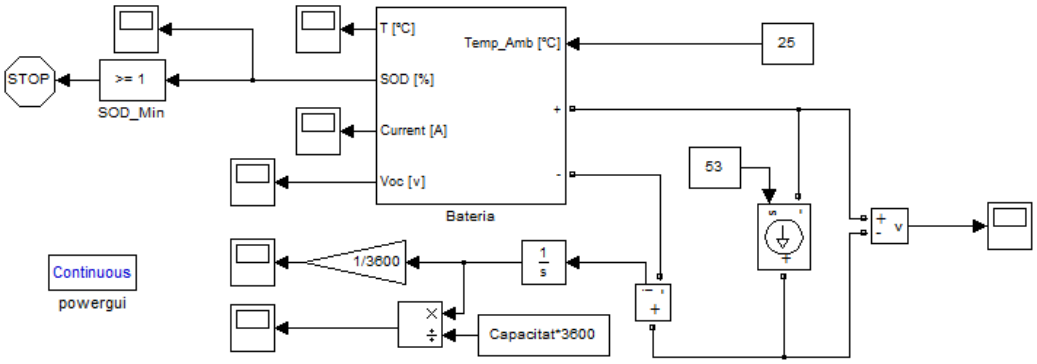


Figura 30. Model de validació de la bateria. (Elaboració pròpia)

Amb aquest model s'han simulat diferents règims de descàrrega obtenint les corbes de la bateria per tal de poder-les comparar amb la bateria de referència, que en aquest cas ha set la bateria disponible a la llibreria SimPowerSystems de Simulink. Les imatges següents mostren la diferència existent entre les corbes originals i les corbes obtingudes a règims de descàrrega de 0,1C, 0,25C, 0,5C, 1C i 2C. Per a la obtenció de les corbes de descàrrega s'ha simulat un procés de descàrrega complet des de un estat de descàrrega del 0% fins al 100%, aplicant una intensitat de descàrrega constant, segons el règim simulat, i a una temperatura ambient de 25ºC.

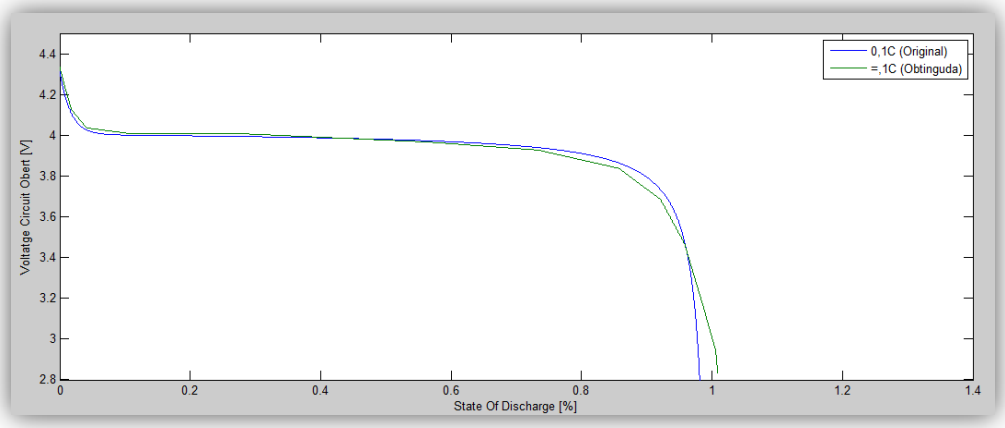


Figura 31. Comparativa de la descàrrega a 0,1C (5,3A) entre corba original i obtinguda.

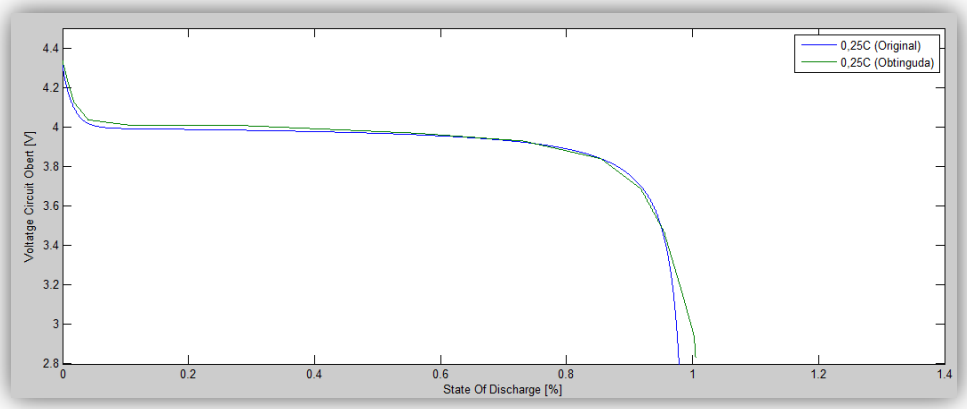


Figura 32. Comparativa de la descàrrega a 0,25C (13,25A) entre corba original i obtinguda. (Elaboració pròpia)

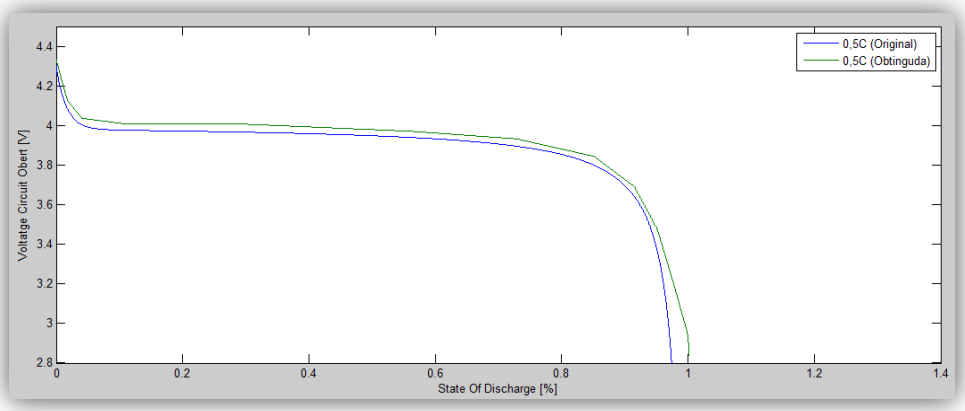


Figura 33. Comparativa de la descàrrega a 0,5C (26,5A) entre corba original i obtinguda. (Elaboració pròpia)

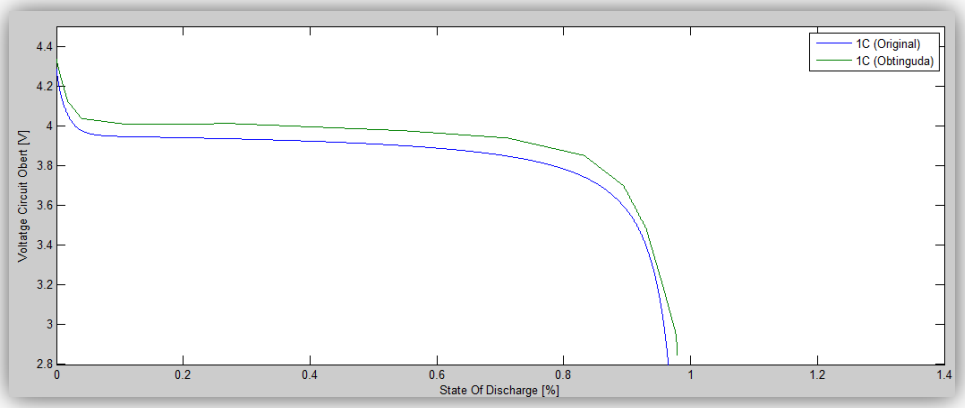


Figura 34. Comparativa de la descàrrega a 1C (53 A) entre corba original i obtinguda. (Elaboració pròpia)

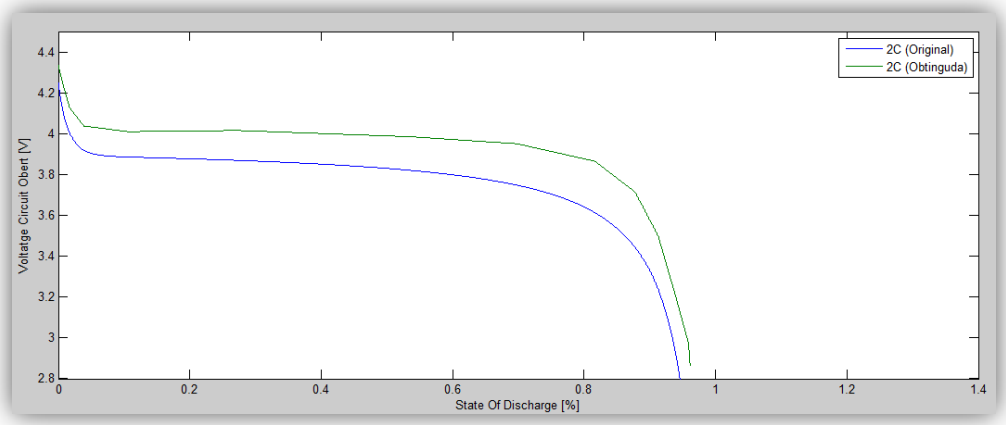


Figura 35. Comparativa de la descàrrega a 2C (106A) entre corba original i obtinguda. (Elaboració pròpia)

Tal i com es pot comprovar, l'ajust obtingut és menor a mesura que augmenta el règim de descàrrega, sent a un règim de 2C on s'aprecia la major diferència. Aquest aspecte no es considera molt important ja que durant el funcionament del vehicle, en cicles de conducció, la màxima sol·licitació d'intensitat a la bateria és de 70A en el moment en que s'assoleix la velocitat màxima, que correspondria a un règim de descàrrega de 1,3C, i aquesta descàrrega es prolonga durant escassos segons. En canvi, la majoria del temps de funcionament, el consum d'intensitat és molt proper als 13,25A que corresponen a un règim de descàrrega de 0,25C i aquí si que el comportament de la bateria modelada és molt similar a la bateria original.

Per validar la dependència de la temperatura s'ha simulat un mateix règim de descàrrega constant fixat en 0,5C (26,5A) i s'han utilitzat diferents valors de temperatura ambient (-20ºC, -10ºC, 0ºC, 25ºC, 40ºC i 60ºC) .

En aquest cas l'interès es centra en comprovar que la capacitat final de la bateria es veu afectada per la temperatura, reduint dràsticament l'energia lliurada a baixes temperatures i mostrant un millor rendiment a mesura que la temperatura augmenta. Tal i com es mostra a la següent figura, el model permet visualitzar aquest efecte de la temperatura, i per al nivell de detall que es pretén aconseguir en aquest aspecte, es considera suficient.

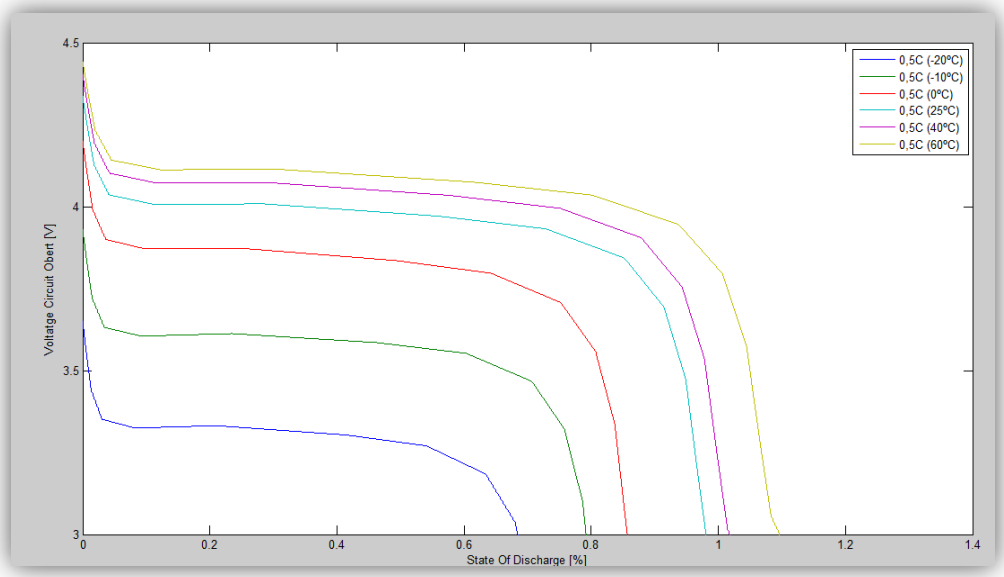


Figura 36. Tensió de les cel·les a diferents temperatures (Obtinguda). (Elaboració pròpia)

El comportament tèrmic de la bateria és el més complex de modelar i per aconseguir un elevat nivell de detall, caldria realitzar un estudi exhaustiu dels fenòmens que intervenen en el procés i això representa un nivell de detall que es troba fora de l'abast i dels objectius d'aquest projecte.

En el cas d'estudi serà suficient amb la relació matemàtica proposta a l'equació (Eq. 8) i la utilització d'un coeficient de transferència de calor que intenta aproximar la mitjana dels casos. Per veure aquesta variació de la temperatura s'ha sotmès el model a una intensitat de descàrrega constant de 40 A i temperatura ambient de 25ºC.

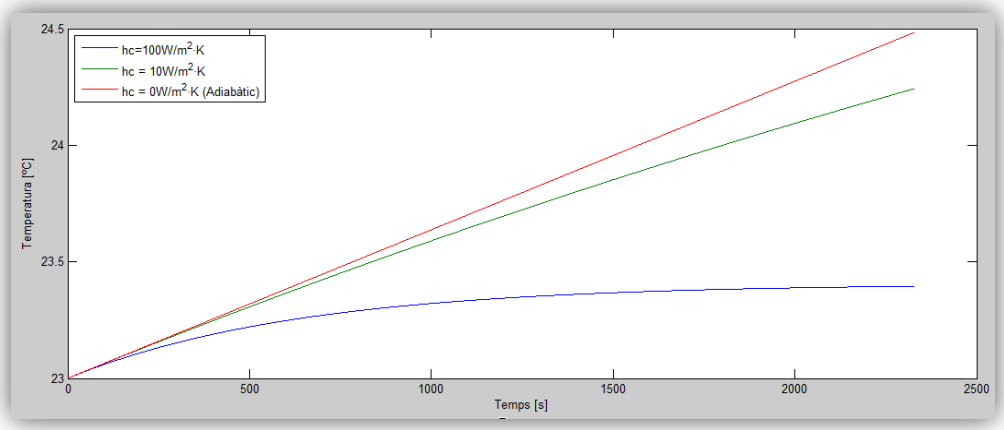


Figura 37. Variació de la temperatura de la bateria en funció del coeficient de transferència de calor. (Elaboració pròpia)

Es pot observar clarament que a major coeficient de transferència, major intercanvi de calor es produirà de la bateria a l'ambient de manera que la temperatura d'aquesta s'estabilitza i no s'escalfa en excés. Val a dir, que amb les característiques simulades en quant al pes de la bateria i a l'àrea d'intercanvi suposada, l'augment màxim de la temperatura de la bateria que es registra suposant un règim d'intensitat de descàrrega màxim de 2C (106A) és de 7,7ºC, passant de 25ºC a 32,7ºC, de manera que el comportament es considera adequat.

6.2. MODELAT DINÀMIC DEL BEV

Mitjançant Simulink es simularà el comportament dinàmic del vehicle, en les condicions de funcionament que s'especificaran a continuació, d'aquesta forma es calcularan amb precisió les prestacions del vehicle i l'autonomia que oferirà en aquestes condicions.

La metodologia de càlcul que es seguirà per al modelat del vehicle elèctric es basarà en els cicles de conducció que es volen simular. Aquests cicles de conducció definiran la velocitat instantània i l'acceleració per a cada instant de temps. Aquestes dues dades, juntament amb els paràmetres de simulació del vehicle, permetran calcular la força necessària per impulsar el vehicle, que s'haurà de transmetre a les rodes.

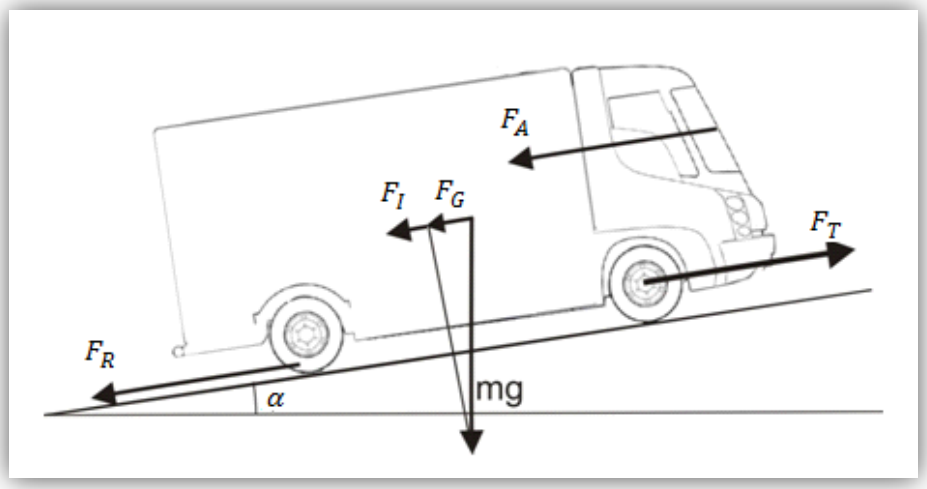


Figura 38. Resistències que intervenen en la dinàmica del vehicle.
(Font: "*Electric Vehicle Technology Explained*")

L'equació que defineix la dinàmica del vehicle és la següent:

$$F_T(t) = R_I(t) + R_G + R_R + R_A(t) \qquad \text{(Eq. 9)}$$

Resistència deguda a la inèrcia:

La resistència deguda a la inèrcia és la força que cal superar per moure el vehicle amb l'acceleració desitjada. Aquesta força actua en sentit contrari a l'acceleració del cotxe, de manera que quan s'està accelerant s'oposa al avanç del vehicle, i quan es frena o desaccelera, actua en el mateix sentit que l'avanç del cotxe.

Com que no es disposa dels valors exactes del sistema mecànic del vehicle, que permetrien calcular les inèrcies dels elements mòbils, s'utilitzarà una aproximació per simplificar aquesta força i englobar-la dins el terme general de l'acceleració (8):

$$R_I(t)[N] = M[kg] \cdot a(t) \left[{}^{m}/_{s^2}\right] \cdot (1 + x) \qquad \text{(Eq. 10)}$$

La massa total del vehicle en ordre de marxa (*M*) és de 750kg, a és l'acceleració que dependrà del cicle de conducció, i x és el coeficient de massa fictícia que engloba els termes inercials, tal i com s'ha comentat anteriorment, i s'expressa com un sobredimensionat de la massa del vehicle en tant per cent. Per un cotxe pren un valor de 0,05 (5%).

Resistència deguda a la gravetat:

La resistència deguda a la gravetat és l'esforç necessari que cal vèncer per superar desnivells, ja que aquesta només afecta al vehicle quan existeix una inclinació del terreny, actuant en la component de la pendent:

$$R_G[N] = M[kg] \cdot g \left[{}^{\boldsymbol{m}}/_{\boldsymbol{s^2}}\right] \cdot \boldsymbol{sin}(\boldsymbol{\alpha}) \qquad \text{(Eq. 11)}$$

g correspon a la gravetat, que a nivell del mar presenta un valor de 9,8 ${}^{\boldsymbol{m}}/_{\boldsymbol{s^2}}$, i $\boldsymbol{\alpha}$ correspon a l'angle que formen el pla inclinat respecte a la horitzontal que dependrà del recorregut que realitzi el vehicle, i que en aquesta simulació es suposarà igual a zero (terreny pla).

Resistència deguda al rodolament:

La resistència de rodolament és la deguda principalment a la fricció de les rodes del vehicle i la carretera. Aquesta força és pràcticament constant i proporcional al pes del vehicle i actua en sentit contrari a l'avanç:

$$R_R[N] = M[kg] \cdot g \left[\boldsymbol{m}/_{\boldsymbol{s^2}} \right] \cdot \boldsymbol{Crr} \cdot \boldsymbol{cos}(\boldsymbol{\alpha}) \qquad \text{(Eq. 12)}$$

On el coeficient de rodolament *Crr* expressa les pèrdues per fricció entre els pneumàtics i el terra, i presenta un valor de 0,008 que és típic en neumàtics dissenyats especialment per vehicles elèctrics.

Resistència aerodinàmica:

Per últim la resistència aerodinàmica, que és la força que oposa l'aire a l'avanç del vehicle i que és funció de l'àrea frontal i de la forma d'aquest:

$$R_A(t)[N] = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \left[kg/_{m^3} \right] \cdot A[m^2] \cdot C_X \cdot (v(t)[m/_s] - v_{vent}\,[m/_s])^2 \qquad \text{(Eq. 13)}$$

On ρ_{aire} és la densitat de l'aire que a 25ºC té un valor de 1,18 kg/m^3 , *A* és l'àrea frontal del vehicle que és de 1,86m^2, v és la velocitat instantània del vehicle que depèn del cicle de conducció i v_{vent} és la velocitat del vent, que depenent de la direcció que tingui, incrementarà (si el vent bufa en contra del moviment) o reduirà (si el vent bufa a favor del moviment) la resistència aerodinàmica, i que en aquesta simulació es considerarà igual a zero. El coeficient de resistència aerodinàmica del vehicle (*Cx*), obtingut a partir d'un procés d'optimització que s'ha dut a terme en el disseny exterior del vehicle i que es presentarà més endavant, resulta ser de 0,328.

Força de tracció total:

La força de tracció necessària per impulsar el vehicle és la suma de totes les resistències anteriors:

$$F_T(t)[N] = R_I(t)[N] + R_G[N] + R_R[N] + R_A(t)[N] \qquad \text{(Eq. 14)}$$

R_I serà negativa si el vehicle desaccelera i R_G serà negativa si es circula per un tram en baixada. Per tant, la força total pot arribar a ser negativa, cas en el que

les rodes transmetran la potència al motor que actuarà de generador i aprofitarà per carregar les bateries a partir d'un mode de funcionament conegut com frenada regenerativa, que es definirà més endavant.

Substituint cadascuna d'aquestes resistències per la seva expressió corresponent s'obté l'expressió general de la dinàmica del vehicle:

$$F_T(t)[N] = M \cdot a(t) \cdot (1+x) + M \cdot g \cdot sin(\alpha) + M \cdot g \cdot Crr \cdot cos(\alpha) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot A \cdot C_X \cdot v(t)^2 \quad \text{(Eq. 15)}$$

Els requeriments de potència que haurà de subministrar el motor a cada instant de temps equival al producte d'aquesta força de tracció per la velocitat del vehicle en cada instant.

$$P_{EIX}(t)[W] = F_T(t)[N] \cdot v(t)[{}^{m}/_{s}] \quad \text{(Eq. 16)}$$

Relació del diferencial:

Una vegada es coneix la potència a l'eix per a cada instant de temps, es determinen els requeriments de parell i velocitat angular que ha de tenir el motor elèctric. Aquesta relació s'estableix a partir de la relació de transmissió fixa del diferencial, que redueix les revolucions del motor i les adequa a les revolucions de l'eix. La relació de transmissió es calcula a partir de l'expressió següent:

$$K_D = \frac{\varpi_{MAX}[rpm] \cdot 2\pi \cdot R[m]}{v_{MAX}[{}^{m}/_{s}] \cdot 60} = 7{,}55 \quad \text{(Eq. 17)}$$

On ϖ_{MAX} són les revolucions màximes a les que pot girar el motor elèctric que seran 8000 rpm, R és el radi de les rodes tractores de 0,3m i v_{MAX} és la velocitat màxima de desplaçament a la que podrà arribar el vehicle i que es limitarà a 120km/h (33,3m/s).

Per comprovar que l'elecció de la relació del diferencial és adequada, es suposarà el cas en que el vehicle hagi de superar un obstacle concret com podria ser una vorera. En aquesta situació, el parell necessari per superar aquest obstacle es calcula a partir de la següent imatge:

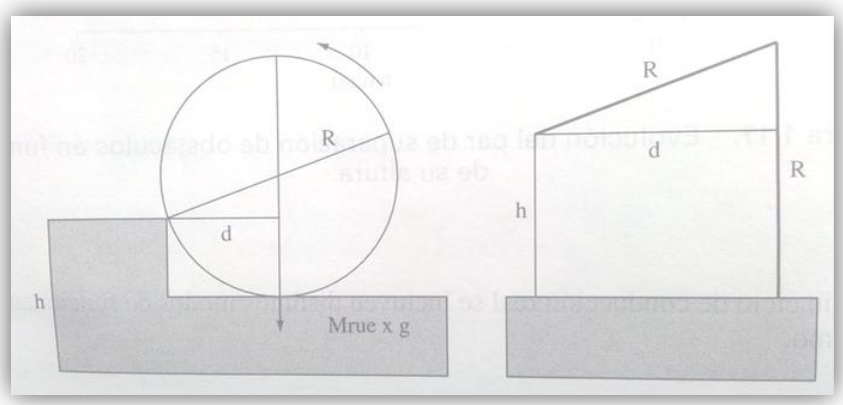


Figura 39. Elements que intervenen en el càlcul d'obstacles.
(Font: "*El Vehículo eléctrico : tecnología, desarrollo y perspectivas de futuro*")

El pic de parell necessari és degut a la distància *d*, que correspon a la distancia entre el punt d'aplicació de la força, que seria el centre de la circumferència de la roda, i el punt de la vorera respecte al qual ha de rotar la roda. La distància *d* s'obté a partir de la següent expressió:

$$d[m] = \sqrt{2 \cdot R[m] \cdot h[m] - h[m]^2} = 0{,}28\ m \qquad \text{(Eq. 18)}$$

On *h* representa l'alçada de la vorera que es considera de 0,2m i *R* és el radi de la roda que és de 0,3m. El parell necessari, aplicat a l'eix de la roda, per superar l'obstacle és:

$$T_{OBS}[Nm] = M_{roda}\,[kg] \cdot g\left[{}^{\boldsymbol{m}}/_{\boldsymbol{s^2}}\right] \cdot d[m] = M_{roda}\ \cdot g \cdot \sqrt{2Rh - h^2} = 514{,}5Nm \qquad \text{(Eq. 19)}$$

Per determinar la massa de la roda M_{roda} , es reparteix la massa total del vehicle en parts iguals a cada roda. Seguidament, per obtenir el parell que ha de desenvolupar el motor, es calcula a partir de la relació del diferencial:

$$T_m[Nm] = \frac{T_{OBS}[Nm]}{K_D} = 68{,}14Nm \qquad \text{(Eq. 20)}$$

De manera que el motor haurà de ser capaç de vèncer aquest parell per superar obstacles d'aquestes característiques.

Càlcul d'ineficiències:

A través de la transmissió de l'energia des de la bateria fins a les rodes, es produeixen diferents ineficiències. Aquestes es contemplen al següent esquema:

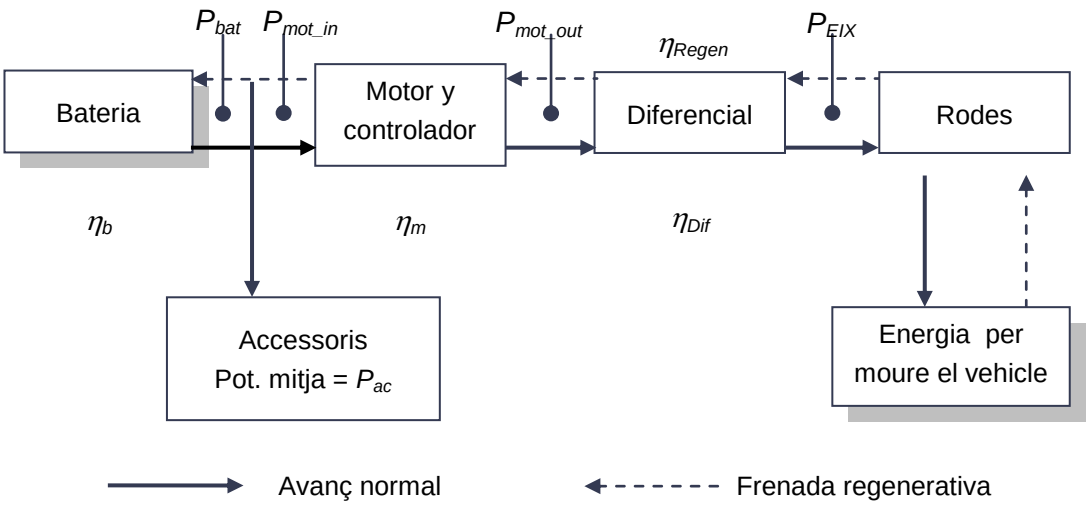


Figura 40. Flux d'energia en un sistema de tracció elèctrica amb frenada regenerativa. (Elaboració pròpia)

El motor és l'encarregat de transmetre la potència a l'eix en els períodes d'acceleració i velocitat constant del vehicle, però en els períodes de desacceleracions, la implementació de la frenada regenerativa fa que el motor treballi com a generador i s'encarrega de transformar la potència mecànica de l'eix en potència elèctrica. Tenint en compte això, caldrà diferenciar entre els períodes on la potència demandada al motor serà positiva i els períodes de desacceleració o en els que es circuli per un tram en baixada, en que la potència de l'eix serà transmesa al motor de manera que es pot considerar com que la potència demandada al motor serà negativa. La potència per ambdós casos s'expressa de la següent manera:

$$P_{EIX}(t) > 0 \rightarrow P_{Motor_OUT}(t)[W] = \frac{P_{EIX}(t)[W]}{\eta_{Dif}} \qquad \text{(Eq. 21)}$$

$$P_{EIX}(t) < 0 \rightarrow P_{Motor_{OUT}}(t)[W] = P_{EIX}(t)[W] \cdot \eta_{Dif} \cdot \eta_{Regen} \qquad \text{(Eq. 22)}$$

On P_{Motor_OUT} representa la potència que ha d'entregar el motor i η_{Dif} és el rendiment mecànic del diferencial que es suposa de 0,95. η_{Regen} representa la limitació en quant a l'energia que es pot recuperar i es suposa en 0,64.

El motor i el controlador es consideren com un únic component, de manera que el rendiment també es considera únic. El càlcul del rendiment instantani del motor es determinaran a partir d'una aproximació de les pèrdues que es produeixen en el bloc:

$$\eta_m = \frac{T \cdot \omega}{T \cdot \omega + T^2 \cdot k_C + k_I \cdot \omega + k_W \cdot \omega^3 + C} \qquad \text{(Eq. 23)}$$

on k_C és el coeficient de pèrdues al coure, k_I és el coeficient de pèrdues al ferro, k_W és el coeficient de pèrdua per fricció amb l'aire i C representa la constant de pèrdues que s'aplica a qualsevol velocitat.

La potència elèctrica que s'ha de subministrar al motor per part de la bateria, si es requereix acceleració, o la potència que el motor enviarà a la bateria en situacions de desacceleració serà:

$$P_{EIX}(t) > 0 \rightarrow P_{Motor_IN}(t)[W] = \frac{P_{Motor_OUT}(t)[W]}{\eta_m} \qquad \text{(Eq. 24)}$$

$$P_{EIX}(t) < 0 \rightarrow P_{Motor_IN}(t)[W] = P_{Motor_OUT}(t)[W] \cdot \eta_m \qquad \text{(Eq. 25)}$$

On P_{Motor_IN} representa la potència que han d'entregar les bateries al motor en cas de sol·licitació de potència, o la potència que reben les bateries en el cas de frenada regenerativa.

Cal tenir en compte en aquest punt, el consum dels accessoris dels que disposa el vehicle, ja que aquests també necessitaran un subministrament de potència per part de la bateria principal en el moment en que la bateria secundària s'hagi exhaurit.

$$P_{Bat}(t)[W] = P_{Motor_{IN}}(t)[W] + P_{AC} \qquad \text{(Eq. 26)}$$

On P_{AC} representa aquest consum de potència per part dels accessoris.

Parell i velocitat angular

La velocitat de gir del motor s'expressa com:

$$\varpi_m(t)\left[{}^{rad}/_{s}\right] = \frac{v[{}^{m}/_{s}]}{R[m]} \cdot K_D \qquad \text{(Eq. 27)}$$

I el parell del motor elèctric serà:

$$T_m(t)[Nm] = \frac{P_{Motor_OUT}(t)[W]}{\varpi_m(t)\left[{}^{rad}/_{s}\right]} \qquad \text{(Eq. 28)}$$

Un aspecte important alhora de la selecció del motor, és que aquest haurà de ser capaç de superar els pics de parell als que serà sotmès durant el cicle de conducció.

6.2.1. MODEL SIMULINK DEL BEV

A partir de les relacions definides en els apartats anteriors es procedeix a desenvolupar un model Simulink que englobi totes aquestes relacions i que interactuant entre elles permeti la obtenció dels resultats desitjats.

Com ja s'ha dit, el model ha sigut implementat amb Simulink, en comptes de codi Matlab, ja que facilita la comprensió gràcies als elements gràfics i permet establir la interacció entre elements de formes més versàtils, amés Simulink és una eina molt potent a l'hora de realitzar càlculs mitjançant mètodes numèrics.

La següent imatge mostra el model complet del vehicle, que a continuació serà desglossat i comentat part per part.

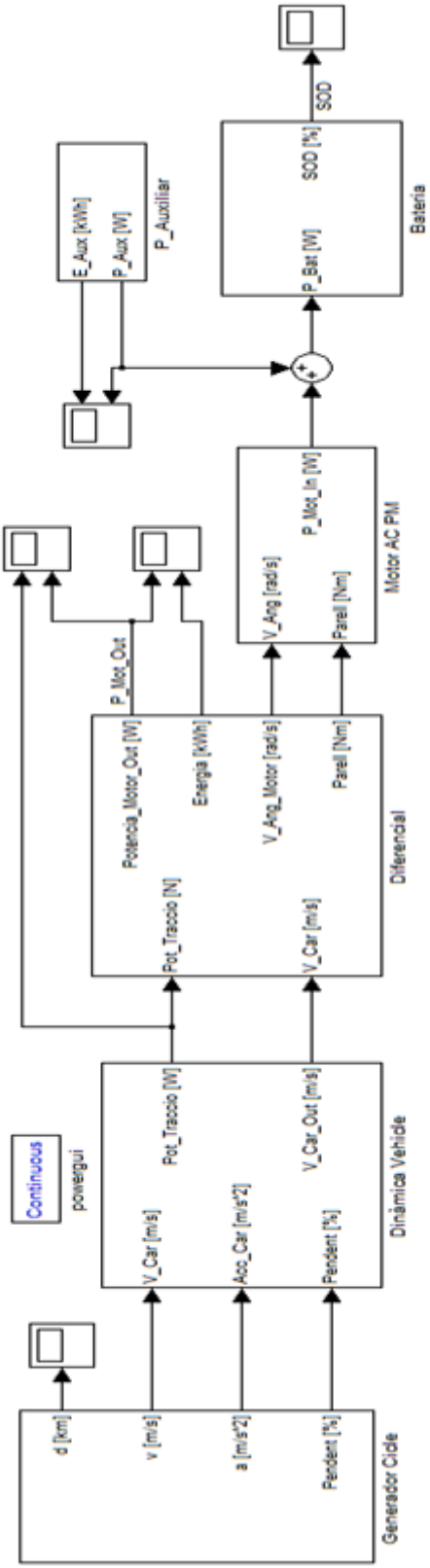


Figura 41. Vista general del model Simulink del vehicle. (Elaboració pròpia)

En primer lloc, comentar la metodologia de funcionament, que posteriorment s'explicarà amb més detall. L'objectiu principal d'aquest model, és permetre a l'usuari obtenir dades d'autonomia del vehicle en funció dels paràmetres introduïts en un arxiu Matlab (annex 2), de manera que aquestes dades s'obtenen a partir de la introducció, com a entrada principal al model, del cicle de conducció a simular. Aquest cicle de conducció s'anirà repetint fins que s'esgoti el 90% de la capacitat de la bateria, moment en el qual la simulació s'aturarà.

Generador del cicle de conducció

El primer bloc, obté el perfil de la velocitat procedent d'un arxiu Matlab i s'encarrega de generar la senyal de velocitat i acceleració en cada instant de temps. Aquest bloc també rep la consigna de la pendent que es vol simular durant el tram recorregut i permet visualitzar la distància recorreguda durant el temps que duri la simulació.

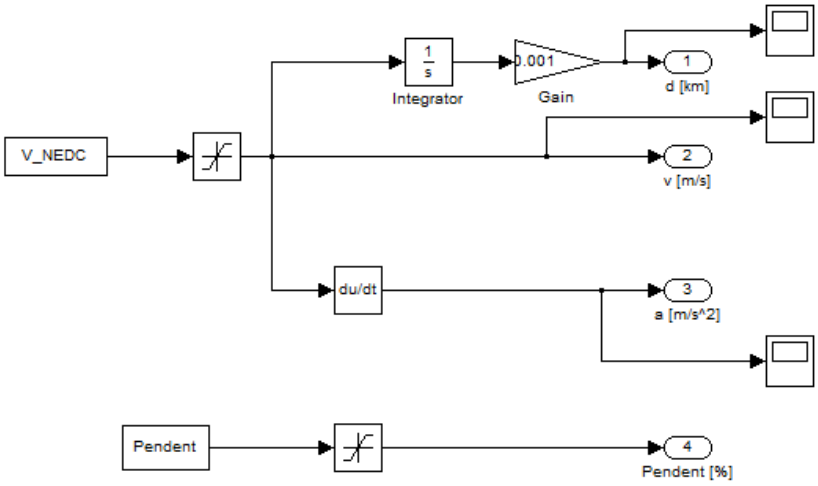


Figura 42. Vista de l'interior del bloc Generador de cicle. (Elaboració pròpia)

Dinàmica del vehicle

Al següent bloc, s'obté la força total necessària com a suma de les resistències que s'han mostrat anteriorment. Cada bloc implementa l'equació corresponent, a partir del paràmetres d'entrada que s'obtenen de l'arxiu Matlab que els conté. La suma d'aquestes resistències equival a la força de tracció necessària per impulsar el vehicle amb la velocitat i acceleració demandades pel cicle de conducció. El producte d'aquesta força de tracció per la velocitat de

desplaçament del vehicle permet obtenir la potència de tracció, que és la potència a l'eix.

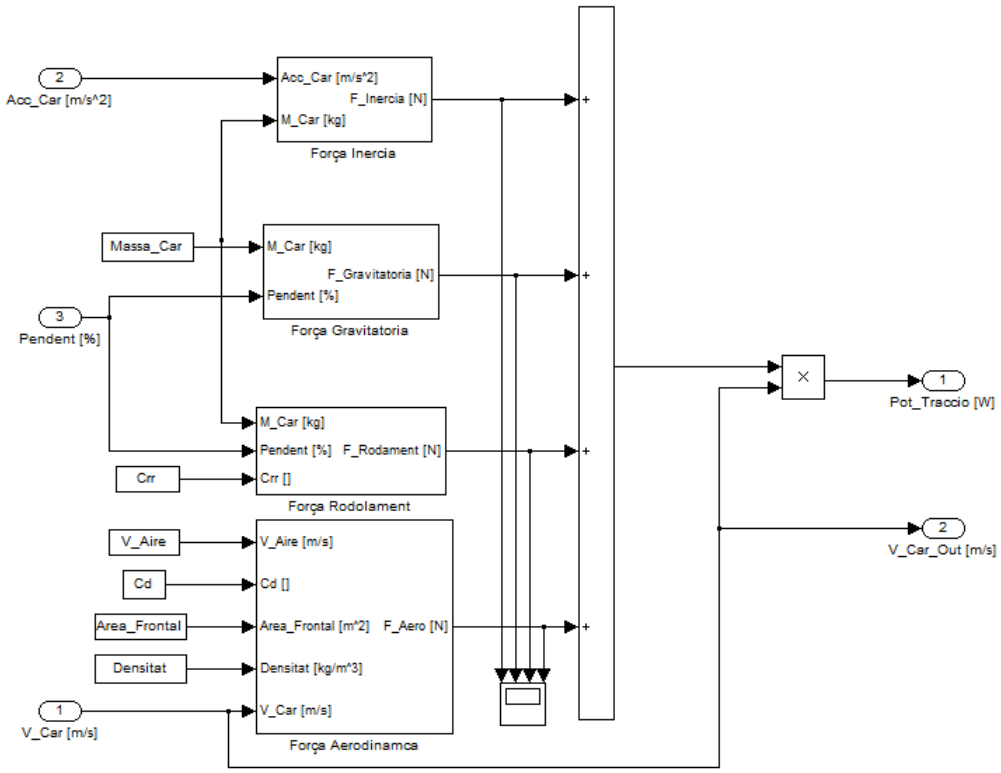


Figura 43. Vista de l'interior del bloc Dinàmica del vehicle. (Elaboració pròpia)

Diferencial

El següent bloc representa el funcionament del diferencial. A la part superior de la següent figura es pot veure el càlcul de la relació de transmissió del diferencial segons els paràmetres d'entrada indicats. A partir d'aquesta relació, s'obté la velocitat angular instantània del motor.

En aquest bloc també es representen les pèrdues mecàniques degudes a la transmissió.

Els blocs "switch" serveixen per seleccionar el camí que travessa l'energia en funció de si la potència és positiva (tracció) o negativa (frenada) i així aplicar correctament els factors de pèrdua. En el cas de la frenada regenerativa, s'aplica un coeficient que determina la quantitat d'energia que es pot "recuperar" en els períodes de desacceleració. Aquest coeficient serà, del 64% ja que és el percentatge d'energia màxim que es pot recuperar amb la tecnologia de frenada

regenerativa que utilitzen els vehicles actuals on el motor actua com a generador i l'energia elèctrica s'emmagatzema a la bateria.

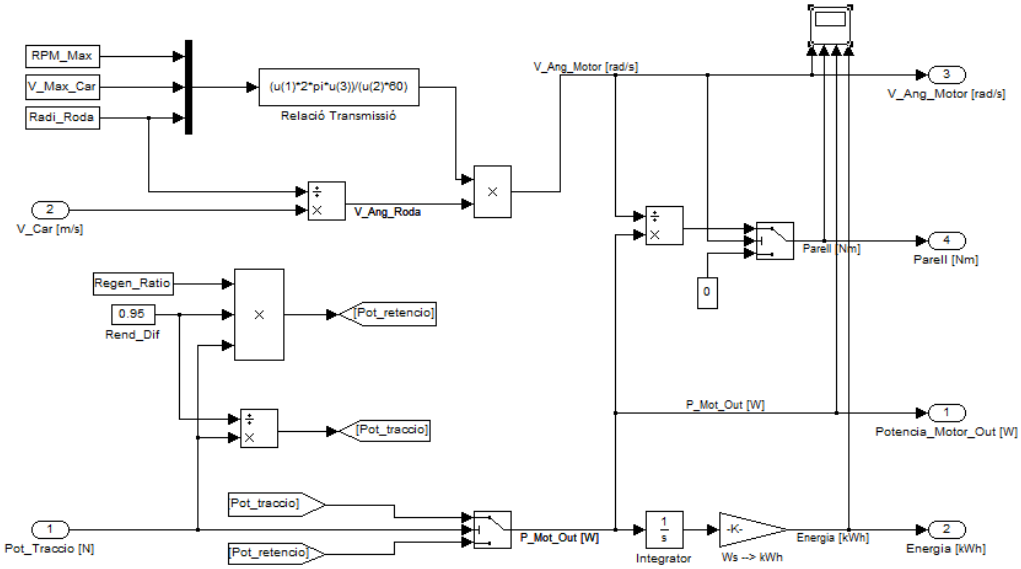


Figura 44. Vista de l'interior del bloc del Diferencial. (Elaboració pròpia)

Les sortides d'aquest bloc fan referència a la potència que ha de subministrar el motor, per cobrir la demanda de potència a l'eix de les rodes, i als requeriments de parell i velocitat angular que ha de satisfer el motor així com l'energia que es consumeix durant la simulació.

Motor

El bloc que fa referència al motor i al controlador té la funció de calcular l'eficiència del motor a cada instant de la simulació, i aplicar-la per al càlcul de la potència elèctrica que s'haurà de subministrar al motor.

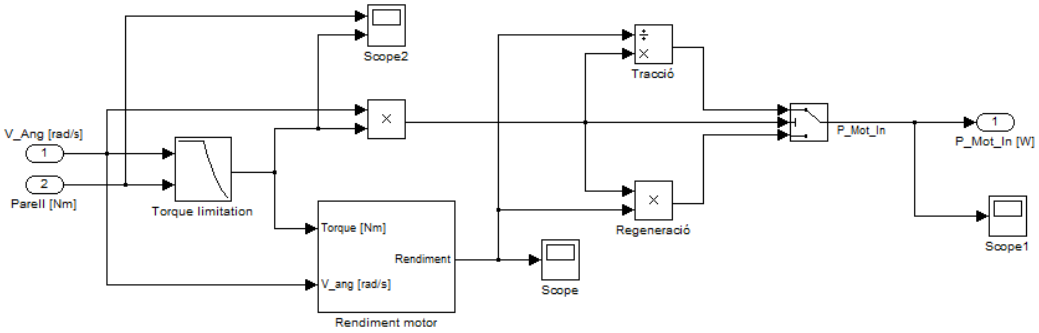


Figura 45. Vista de l'interior del bloc del Motor. (Elaboració pròpia)

A l'entrada del bloc s'obtenen els requeriments de parell i velocitat angular provinents del diferencial i s'adeqüen a la corba característica de potència del motor seleccionat. A partir d'aquesta correcció, es calcula el rendiment i s'aplica correctament en funció de si la potència és positiva (tracció) o negativa (frenada) mitjançant el "switch".

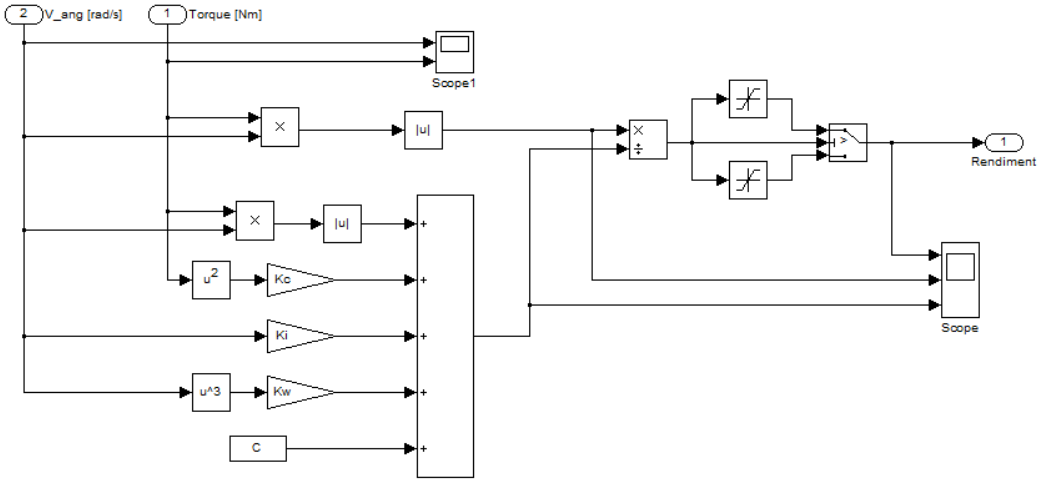


Figura 46. Vista de l'interior del bloc Motor >> Rendiment motor. (Elaboració pròpia)

El càlcul del rendiment es realitza a partir de les entrades de parell i velocitat angular del motor juntament amb les pèrdues característiques del motor elèctric, implementant l'equació (Eq. 23).

La senyal de sortida del bloc del motor representa la potència elèctrica que s'ha de subministrar al motor per part de la bateria.

Sistemes auxiliars

A aquesta potència elèctrica que s'ha de subministrar al motor per part de la bateria, és necessari sumar-hi la potència necessària per accionar la resta d'elements auxiliars del vehicle, com són les llums, el sistema de condicionament de l'aire de l'habitacle, la ràdio, etc.

És difícil predir quin serà el consum de cadascun d'aquests elements doncs depèn en part dels hàbits de l'usuari. Per exemple, en dies molt calorosos repercuteix d'una forma molt diferent el mantenir l'habitacle ben tancat i una temperatura moderada que tenir la finestreta oberta i una temperatura de climatització excessivament baixa. La resta d'accessoris tenen consums que, individualment no repercuteixen molt en el global del consum del vehicle, en

canvi si s'utilitzen tots simultàniament l'efecte és més important tal i com es veurà en apartats següents.

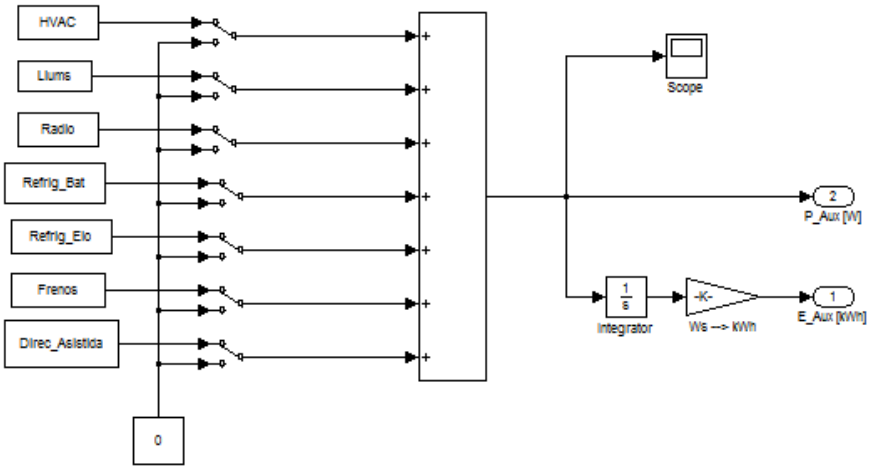


Figura 47. Vista de l'interior del bloc Sistemes auxiliars. (Elaboració pròpia)

Bateria

L'últim bloc del model inclou la bateria de LiFePO, ja s'ha descrit a l'apartat anterior, i el sistema per controlar la seva descàrrega. Les entrades de la bateria són els terminals elèctrics positiu i negatiu i la temperatura ambient. Les sortides permeten visualitzar la intensitat que subministra la bateria, el voltatge i l'estat de descàrrega SOD.

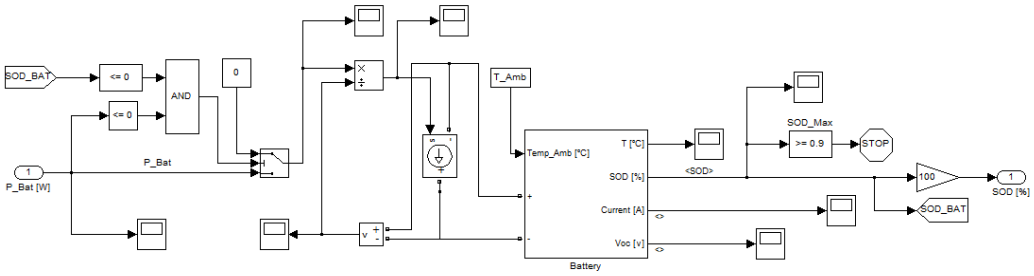


Figura 48. Vista de l'interior del bloc de la bateria. (Elaboració pròpia)

Per extreure l'energia demandada pel vehicle, s'introdueix una font d'intensitat controlada que fa circular un corrent a través de la bateria. Aquesta intensitat és calculada a partir de la llei següent:

$$P = V \cdot I \qquad \text{(Eq. 29)}$$

On *P* és la potència demandada pel motor, per moure el vehicle, i pels sistemes auxiliars per alimentar els accessoris i *V* és el potencial als borns de la bateria que, com s'ha vist depèn de l'estat de descàrrega, de la temperatura i de la intensitat que circula per la bateria.

La resta de blocs del model són de control perquè la bateria no es sobrecarregui en el cas que estigui completament carregada i funcioni la frenada regenerativa, i per altre banda per evitar que es descarregui per sobre del 90% de l'estat de descàrrega, la qual cosa implicaria un forta degradació de la bateria.

6.2.2. PARÀMETRES DE SIMULACIÓ

El paràmetres utilitzats per a la simulació són els següents:

Condicions ambientals

Densitat de l'aire	1,18	kg/m^3
Gravetat	9,8	m/s^3
Velocitat de l'aire	0,0	m/s
Temperatura ambient	25,0	ºC

Taula 1. Paràmetres de simulació (Condicions ambientals). (Elaboració pròpia)

Dinàmica del vehicle

Massa en ordre de marxa	750	kg
Area frontal	1,86	m^2
Coeficient aerodinàmic (C_X)	0,328	-
Radi de les rodes	0,3	m
Coeficient de rodolament (C_{rr})	0,008	-
Velocitat màxima	120	km/h
Coeficient de regeneració	0,64	-
Coeficient d'adherència a l'asfalt (f_a)	0,7	-
Repartiment de pes eix davanter - eix posterior	60 - 40	%
Inclinació del recorregut	0	%

Taula 2. Paràmetres de simulació (Dinàmica del vehicle). (Elaboració pròpia)

Paràmetres del diferencial

Rendiment del diferencial	0,95	-
Relació de transmissió	7,55:1	-

Taula 3. Paràmetres de simulació (Diferencial). (Elaboració pròpia)

Paràmetres del motor

Els paràmetres del motor es basen en el model PowerPhase 75 Motor/Generator del fabricant UQM.

Potència nominal	45	kW
Potència màxima	75	kW
Parell nominal	150	Nm
Parell màxim	240	Nm
Velocitat angular màxima	8.000	rpm
Massa motor i controlador	60	kg
Rendiment màxim	0,94	-

Taula 4. Paràmetres de simulació (Motor & Controlador).

Paràmetres per al càlcul dinàmic del rendiment del motor

Per calcular dinàmicament el rendiment del motor en funció de la potencia demandada, s'han utilitzat els valors obtinguts a partir de les característiques d'altres motors d'inducció similars.

Coeficient de pèrdues al coure (k_C)	0,3	-
Coeficient de pèrdues al ferro (k_I)	0,01	-
Coeficient de pèrdues per fricció amb l'aire (k_w)	$5{,}0 \cdot 10^{-9}$	-
Pèrdues constants (C)	50	W

Taula 5. Paràmetres de simulació (Rendiment motor). (Elaboració pròpia)

Paràmetres de la bateria

Els paràmetres de la bateria han estat obtinguts del fabricant KOKAM. Aquestes dades s'han completat amb informació del model de bateria de la llibreria SimPowerSystems de Simulink.

Voltatge nominal	403,3	V
Capacitat	53	Ah
Energia elèctrica disponible	20	kWh
Nº cel·les en serie	109	u
Nº cel·les en paral·lel	1	u
Massa de les cel·les	1,20	kg/u
Resistència interna per cel·la	$6{,}9 \cdot 10^{-4}$	Ω
Resistència interna total	$7{,}6 \cdot 10^{-2}$	Ω
Massa de la bateria	180	kg

Taula 6. Paràmetres de simulació (Bateria). (Elaboració pròpia)

Paràmetres del model tèrmic de la bateria

Alguns dels valors per al càlcul del model tèrmic s'han suposat similars a casos coneguts:

Transferència de calor	0,3	$W/m^2 \cdot K$
Àrea de transferència	3	m^2
Capacitat calorífica	1.062	J/K
Tipus de refrigeració	atmosfèrica	-

Taula 7. Paràmetres de simulació (Model tèrmic de la bateria). (Elaboració pròpia)

Paràmetres dels sistemes auxiliars

Els consums de potència que s'han suposat per als sistemes auxiliars són:

Climatització i aire condicionat (HVAC)	1000	1000	*W*
Llums	400	400	*W*

Radio	50	50	*W*
Refrigeració de la bateria	800·0,8	640	*W*
Refrigeració del motor i l'electrònica	800	800	*W*
Frens	500·0,5	250	*W*
Direcció assistida	700·0,6	420	*W*

Taula 8. Paràmetres de simulació (Sistemes auxiliars). (Elaboració pròpia)

6.2.3. PRESTACIONS

6.2.3.1. Capacitat d'acceleració

Corba característica del motor

Una característica important en un vehicle és la seva capacitat d'acceleració. Aquest paràmetre s'acostuma a presentar en temps necessari per passar de 0 a 100 km/h. En aquest apartat es calcularà l'acceleració del vehicle a màxima potència, a partir de les equacions que es descriuran a continuació.

Els motors elèctrics, a diferència dels motors tèrmics, ofereixen el seu parell màxim a baixes revolucions i amés aquest acostuma a ser pràcticament constant fins arribar a la velocitat crítica o nominal. Sobrepassada aquesta velocitat crítica del motor, a mida que es continuen augmentant les revolucions el parell tendeix a caure, mantenint la potència constant.

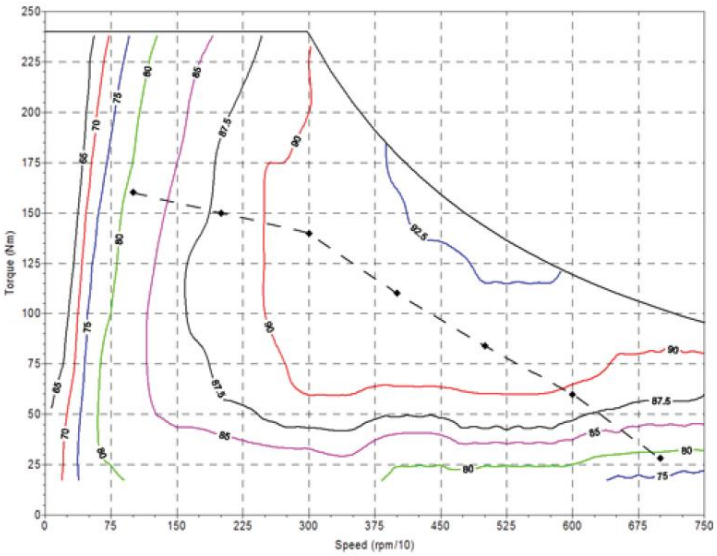


Figura 49. Corba de potència del motor PowerPhase 75 Motor/Generator del fabricant UQM. (Font: UQM)

Com es pot veure a la gràfica subministrada pel fabricant, el parell màxim arriba fins als 240 Nm, i es troba disponible fins a una velocitat angular crítica o nominal de 3000 rpm.

Relacions matemàtiques

El càlcul de l'acceleració en un vehicle de motor tèrmic es realitza a potència màxima o accelerador a fons. En el cas dels vehicles elèctrics, les simulacions d'acceleració es realitzen a parell màxim, degut a la característica típica dels motors elèctrics, que ofereixen aquest parell màxim des de molt baixes revolucions. A continuació es vol simular la capacitat d'acceleració màxima del vehicle suposant que es circula per terreny pla i per tant $\alpha = 0$.

En primer lloc es calcula l'esforç tractor màxim que podrà aplicar el vehicle sense lliscament de les rodes respecte a l'asfalt, que depèn del coeficient d'adherència amb l'asfalt. Per obtenir aquest esforç cal conèixer el pes adherent, que és la massa que haurà de suportar l'eix tractor, en aquest cas el davanter. El percentatge de distribució de la massa del vehicle, s'estableix en un 60% a l'eix davanter i el 40% restant a l'eix posterior. El pes adherent serà:

$$P_a = M_{EIX\ Davanter} \cdot g = 750 \cdot 0{,}6 \cdot 9{,}8 \cdot = 4410\ N \qquad \text{(Eq. 30)}$$

Per a un coeficient d'adherència òptim de 0,7 l'esforç tractor màxim serà:

$$F_a = P_a \cdot f_a = 4410 \cdot 0{,}7 = 3087\ N \qquad \text{(Eq. 31)}$$

El parell màxim que es podrà aplicar a les rodes, quedarà limitat per l'adherència, degut al baix pes del vehicle. Per calcular el parell màxim aplicable sense lliscament de les rodes s'aplica:

$$F_a = \eta_{Diff} \cdot \frac{T_{MAX_Adh} \cdot K_D}{R} \qquad \text{(Eq. 32)}$$

Aïllant el parell màxim s'obté:

$$T_{MAX_Adh} = \frac{F_a \cdot R}{\eta_{Diff} \cdot K_D} = \frac{3087 \cdot 0{,}3}{0{,}95 \cdot 7{,}54} = 129{,}3Nm \qquad \text{(Eq. 33)}$$

De manera que aquest serà el parell màxim del motor aplicable per evitar el lliscament de les rodes. L'expressió del parell del motor, en funció de la força de tracció necessària per moure el vehicle és la següent.

$$T = \eta_{Diff} \cdot \frac{F_T \cdot R}{K_D} \qquad \text{(Eq. 34)}$$

De manera que la força de tracció expressada en funció del parell és:

$$F_T = \frac{K_D}{R \cdot \eta_m} \cdot T \qquad \text{(Eq. 35)}$$

On substituint els paràmetres a l'equació queda:

$$F_T = \frac{7{,}54}{0{,}3 \cdot 0{,}95} \cdot T = 26{,}46 \cdot T \qquad \text{(Eq. 36)}$$

A continuació es calculen les resistències amb les equacions de la dinàmica del vehicle:

$$R_I = 1{,}05 \cdot M \cdot a \qquad \text{(Eq. 37)}$$

$$R_R = 9{,}8 \cdot 0{,}008 \cdot 1 \cdot M = 0{,}0784 \cdot M \qquad \text{(Eq. 38)}$$

$$R_G = M \cdot 9{,}8 \cdot sin(0) = 0 \qquad \text{(Eq. 39)}$$

$$R_A = \frac{1}{2} \cdot 1{,}18 \cdot 1{,}86 \cdot 0{,}328 \cdot v^2 = 0{,}36 \cdot v^2 \qquad \text{(Eq. 40)}$$

La força de tracció, que és igual a la suma de les resistències anteriors serà:

$$F_T = 1{,}05 \cdot M \cdot a + 0{,}0784 \cdot M + 0{,}36 \cdot v^2 \qquad \text{(Eq. 41)}$$

Substituint $a = dv/dt$ queda:

$$F_T = 1{,}05 \cdot M \cdot \frac{dv}{dt} + 0{,}0784 \cdot M + 0{,}36 \cdot v^2 \qquad \text{(Eq. 42)}$$

Igualant les dues expressions de la força de tracció:

$$26{,}46 \cdot T = 1{,}05 \cdot M \cdot \frac{dv}{dt} + 0{,}0784 \cdot M + 0{,}36 \cdot v^2 \qquad \text{(Eq. 43)}$$

Al interval de funcionament del motor on el parell és constant i la velocitat angular és inferior a la velocitat crítica es compleix:

$$Per\ \omega < \omega_c = 314{,}16\ \frac{rad}{s} \quad o \quad v < \frac{R}{K_D} \cdot \omega_c = 12{,}5 \frac{m}{s}$$
$$\rightarrow \quad T = T_{MAX_Adh} = 129{,}3\ Nm \qquad \text{(Eq. 44)}$$

$$26{,}46 \cdot 129{,}3 = 0{,}0784 \cdot M + 0{,}36 \cdot v^2 + 1{,}05 \cdot M \cdot \frac{dv}{dt} \qquad \text{(Eq. 45)}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{3421{,}3 - 0{,}0784 \cdot M - 0{,}36 \cdot v^2}{1{,}05 \cdot M} \qquad \text{(Eq. 46)}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{M}(6048 - 0{,}343 \cdot v^2) - 0{,}075 \qquad \text{(Eq. 47)}$$

Per resoldre aquesta equació amb Matlab, la derivada de v es defineix com la diferència entre valors consecutius de v, dividits per l'interval de temps dt:

$$\frac{v_{n+1} - v_n}{dt} = \frac{1}{M}(3421{,}3 - 0{,}343 \cdot v^2) - 0{,}075 \qquad \text{(Eq. 48)}$$

L'expressió per calcular els termes consecutius de la velocitat queda:

$$v_{n+1} = v_n + dt \cdot \left(\frac{1}{M}(3421{,}3 - 0{,}343 \cdot v^2) - 0{,}075\right) \qquad \text{(Eq. 49)}$$

Una vegada la velocitat angular del motor supera la velocitat angular crítica, el parell del motor decreix mantenint constant la potència. L'expressió que defineix aquest decreixement és:

$$Per\ \omega > \omega_c = 314{,}16\ \frac{rad}{s} \quad o \quad v > \frac{R}{K_D} \cdot \omega_c = 12{,}5 \frac{m}{s}$$

$$\rightarrow \quad T = \frac{T_{MAX_{Ad\,h}} \cdot \omega_c}{\omega} = \frac{R \cdot T_{MAX_{Ad\,h}} \cdot \omega_c}{K_D \cdot v} = \frac{0{,}3 \cdot 129{,}3 \cdot 314{,}16}{7{,}54 \cdot v} \qquad \text{(Eq. 50)}$$

$$= \frac{1623{,}7}{v}$$

Igualant les dues expressions de la força de tracció igual que en el cas anterior:

$$26{,}46 \cdot \frac{1623{,}7}{v} = 0{,}0784 \cdot M + 0{,}36 \cdot v^2 + 1{,}05 \cdot M \cdot \frac{dv}{dt} \qquad \text{(Eq. 51)}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{M} \cdot \left(\frac{42963{,}5}{v} - 0{,}343 \cdot v^2\right) - 0{,}075 \qquad \text{(Eq. 52)}$$

Adequant l'equació per simular-la amb Matlab:

$$v_{n+1} = v_n + dt \cdot \left(\frac{1}{M}\left(\frac{42963{,}5}{v} - 0{,}343 \cdot v^2\right) - 0{,}075\right) \qquad \text{(Eq. 53)}$$

Per últim, s'implementa una tercera fase en la que es limita la velocitat màxima a 120km/h d'acord amb les especificacions desitjades.

Model MATLAB

Una vegada establertes les relacions matemàtiques, es desenvolupa un codi amb Matlab que resol la velocitat en intervals d'un segon. Aquest codi és la transcripció a llenguatge de programació de les equacions anteriors.

```
t = linspace(0,20,201);  % de 0 a 20 s, en intervals de 0.1 s
v = zeros(1,201);        % 201 lectures de velocitat
dT = 0.1;                % intervals de temps de 0.1 s
M = 750;                 % Massa del vehicle

for n= 1:200
    if v(n) < 12.5       % de 0 a 12,5 m/s s'aplica el parell màxim
        v(n+1) = v(n) + dT*(((3421.3-0.343*(v(n)^2))/M)-0.075);
    elseif v(n) > 33.3   % velocitat limitada a 33,3 m/s (120 km/h)
            v(n+1) = v(n);
    else                 % a partir de 12,5 m/s s'aplica potència constant
        v(n+1) = v(n)+dT*((((42963.5/v(n))-0.343*(v(n)^2))/M)-0.075);
    end;
    d(n+1) = d(n) + 0.1*v(n);
end;
V = v * 3.6;             % velocitat en km/h
plot(t,V);
```

Figura 50. Codi MATLAB del programa per simular l'acceleració del vehicle. (Elaboració pròpia)

Resultats

Com es pot comprovar a la següent gràfica, el vehicle té una capacitat d'acceleració on passa de 0 a 100km/h en poc més de 8,7s, i assoleix els 120km/h en 12,9s. Aquestes xifres són molt bones en quant a prestacions, ja que la mitjana en els vehicles del segment A és de 14,3s per arribar als 100km/h tal i com es mostra a la Figura 3.

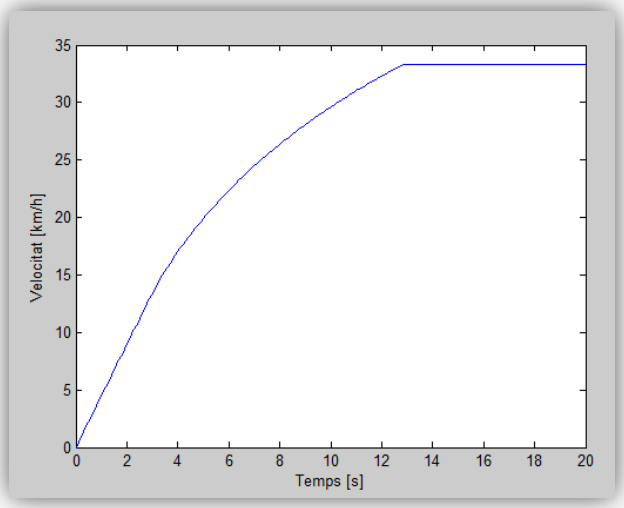


Figura 51. Corba d'acceleració màxima del vehicle. (Elaboració pròpia)

Com ja s'ha comentat anteriorment, els motors elèctrics lliuren la seva potència principalment a velocitats baixes, la qual cosa fa que els vehicles impulsats per aquests motors siguin més àgils en ciutat. Amés, el no disposar de canvi de

marxes fa que la progressió sigui més suau i alhora el vehicle és més fàcil de conduir contràriament a un vehicle amb motor tèrmic, on la gestió del règim del motor i del canvi de marxes, produeix lliuraments de potència irregulars segons les revolucions del motor que dificulten la conducció.

6.2.3.2. Pendent màxim superable

Per determinar el pendent màxim superable pel vehicle, s'ha de conèixer el seu pes adherent, que ja s'ha calculat a l'equació 30, i que és igual a 4.110N. A baixes velocitats, la resistència aerodinàmica es pot considerar menyspreable de manera que la resistència que s'oposa a l'avanç del vehicle respon a l'expressió següent:

$$F_T = R_G + R_R \qquad \text{(Eq. 54)}$$

L'esforç màxim en aquest cas serà igual al pes adherent:

$$P_a \cdot f_a \cdot cos(\boldsymbol{\alpha}) = M \cdot g \cdot \boldsymbol{sin}(\boldsymbol{\alpha}) + M \cdot g \cdot \boldsymbol{Crr} \cdot \boldsymbol{cos}(\boldsymbol{\alpha}) \qquad \text{(Eq. 55)}$$

Operant quedarà:

$$P_a \cdot f_a = M \cdot g \cdot \boldsymbol{tg}(\boldsymbol{\alpha}) + M \cdot g \cdot \boldsymbol{Crr} \qquad \text{(Eq. 56)}$$

Substituint els paràmetres de la simulació a l'expressió anterior quedarà:

$$\boldsymbol{tg}(\boldsymbol{\alpha}) = \frac{P_a \cdot f_a - M \cdot g \cdot \boldsymbol{Crr}}{M \cdot g} = \frac{3087 - 58{,}8}{7350} = 0{,}412 \qquad \text{(Eq. 57)}$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{arctg}(\boldsymbol{\alpha}) = 22{,}39º \qquad \text{(Eq. 58)}$$

La rampa màxima seria de 41,2%, però en aquest cas el vehicle no podria accelerar, de manera que es considera una rampa inferior en un 10% quedant en un 37% el pendent màxim superable, permetent al vehicle un cert marge de maniobra.

6.2.4. CICLES DE CONDUCCIÓ

Per la simulació de l'autonomia del vehicle, s'utilitzarà el cicle de conducció NEDC com a referència. El motiu d'utilització d'aquest cicle és perquè es tracta

del cicle de conducció utilitzat actualment per a la homologació dels vehicles a Europa. Aquest aspecte permet comparar els resultats obtinguts amb els resultats reals d'altres vehicles testejats sota les mateixes condicions.

Cicle Europa (NEDC):

El cicle consta de dues parts ben diferenciades i que es basen, en el primer cas d'un cicle de conducció urbana amb continues acceleracions i desacceleracions i períodes de velocitat constant que no superen els 50km/h. El cicle extraurbà també consta de períodes d'acceleracions més prolongades i trams de velocitat constant més elevada fins a assolir una velocitat màxima de 120km/h.

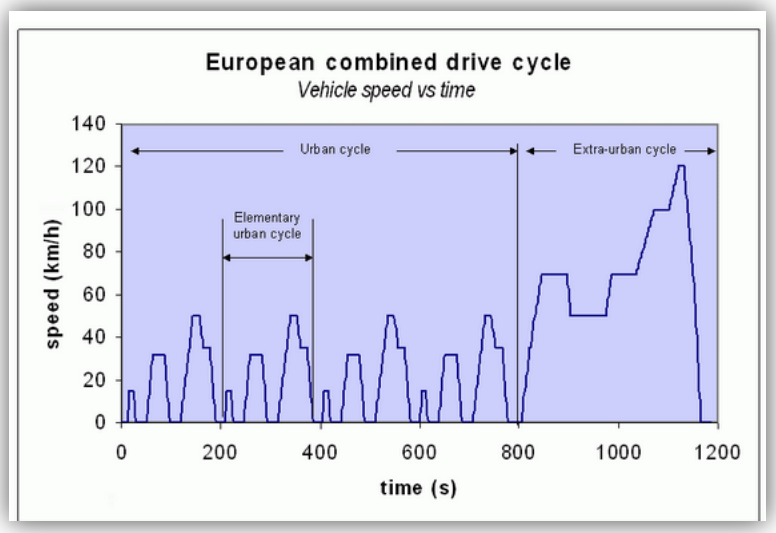


Figura 52. Perfil de velocitat del cicle de conducció NEDC. (Font: Wikipedia)

El cicle complet consta de quatre repeticions del cicle urbà i una repetició del cicle extraurbà, fins arribar a una duració total d'uns 19 minuts i una distància recorreguda d'uns 11 quilòmetres.

6.2.5. AUTONOMIA

Presentació de la simulació

Una vegada obtingudes les relacions matemàtiques i desenvolupat el model del vehicle elèctric amb Simulink ja podem introduir les variables que representen l'entorn per obtenir els resultats de com seria el comportament d'aquest vehicle a la realitat. Com hem vist, el model del vehicle respon davant els principals fenòmens físics que regeixen el moviment dels automòbils:

- El fregament de les rodes amb l'asfalt.

- La resistència aerodinàmica al augmentar la velocitat de desplaçament, condicionada per la forma i àrea frontal del vehicle.
- Les inèrcies degudes als canvis de velocitat.
- Les inèrcies dels mecanismes interns.
- L'increment de la resistència a l'avanç deguda a la presencia de desnivells en el recorregut.

S'han tingut en compte les ineficiències del diferencial i del motor elèctric, que depenen del parell i del règim de gir, així com el coeficient de regeneració en els períodes de frenada regenerativa. El model també permet variar la potència dels sistemes auxiliars variant l'energia necessària per alimentar aquests sistemes necessaris del vehicle.

El model del vehicle elèctric també disposa del model de bateria que representa una bateria de LiFePO. El modelatge d'aquesta bateria intenta reproduir amb precisió les dades obtingudes dels fulls de característiques dels fabricants, i pretén aproximar el millor possible altres aspectes que no s'han pogut contrastar. El model de la bateria respon davant les principals variables que governen el seu funcionament. Així el model respon segons:

- La variació del potencial en funció de la càrrega.
- La variació de l'energia emmagatzemada en funció de la temperatura interna.
- El fenomen d'acumulació de calor i dissipació d'aquest a l'ambient.

Amb tot això es pot calcular l'estat de descàrrega de la bateria d'una forma molt precisa i així calcular com serà l'autonomia real del vehicle en funció de les condicions de simulació.

A continuació es mostra el diagrama de flux que explica el funcionament pas a pas de la simulació.

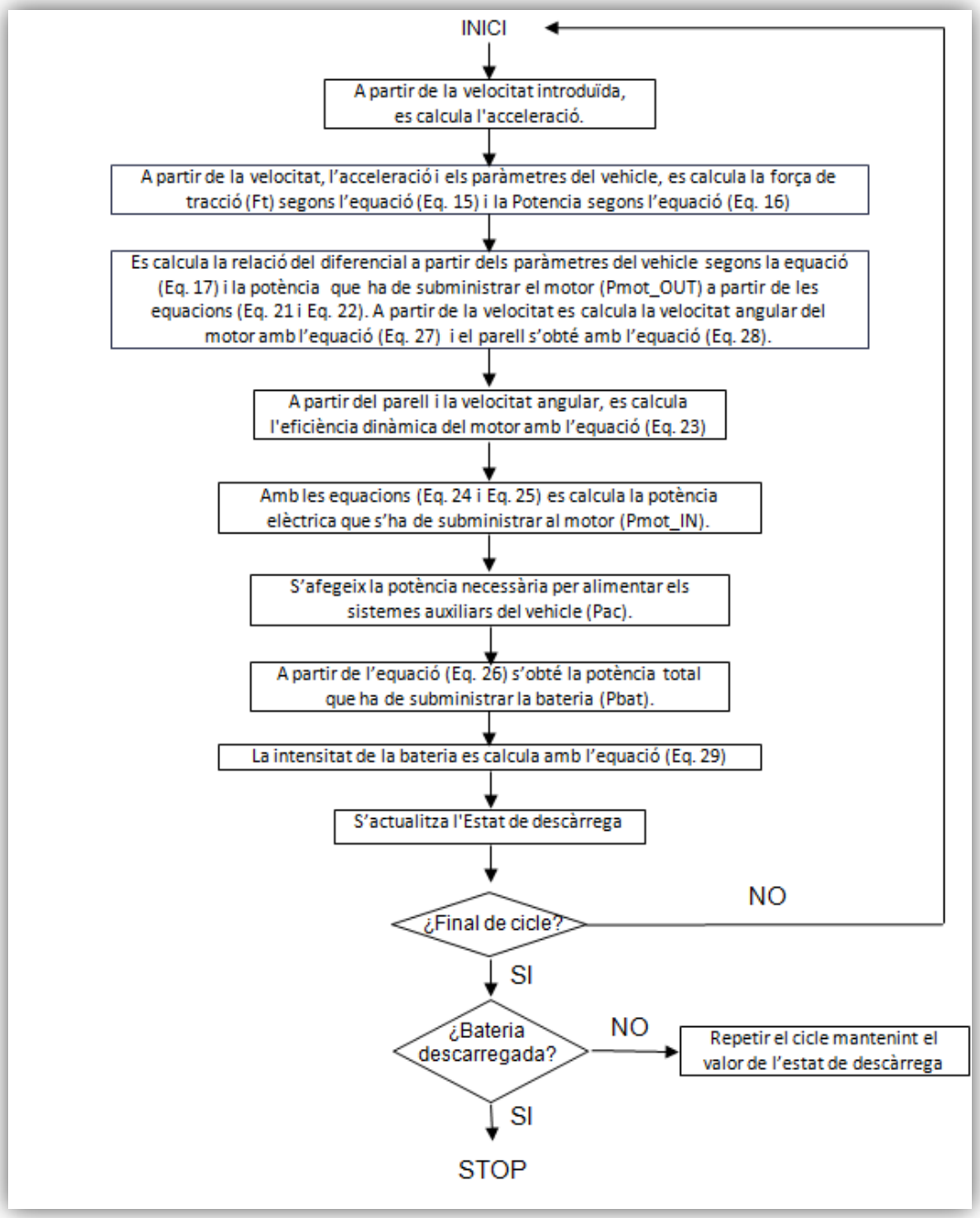


Figura 53. Diagrama de flux del funcionament de la simulació del vehicle. (Elaboració pròpia)

6.2.6. RESULTATS OBTINGUTS

Per al càlcul de l'autonomia del vehicle, es va repetint el cicle NEDC fins que la bateria s'esgota. Això serà quan l'estat de descàrrega (SOD) arribi al 90%, ja que s'evitarà descarregar la bateria al 100% per evitar danys irreversibles.

Les condicions normals de simulació es consideren a partir de la utilització dels paràmetres de simulació definits a l'apartat 6.2.2. En quant als sistemes auxiliars, no es consideren els consums dels sistemes de climatització (HVAC), il·luminació ni tampoc la radio, ja que alhora d'homologar un vehicle elèctric aquests sistemes es desconnecten.

Amb aquests paràmetres s'ha obtingut una autonomia de 154,78km per cada recàrrega de la bateria tal i com es mostra en la següent imatge.

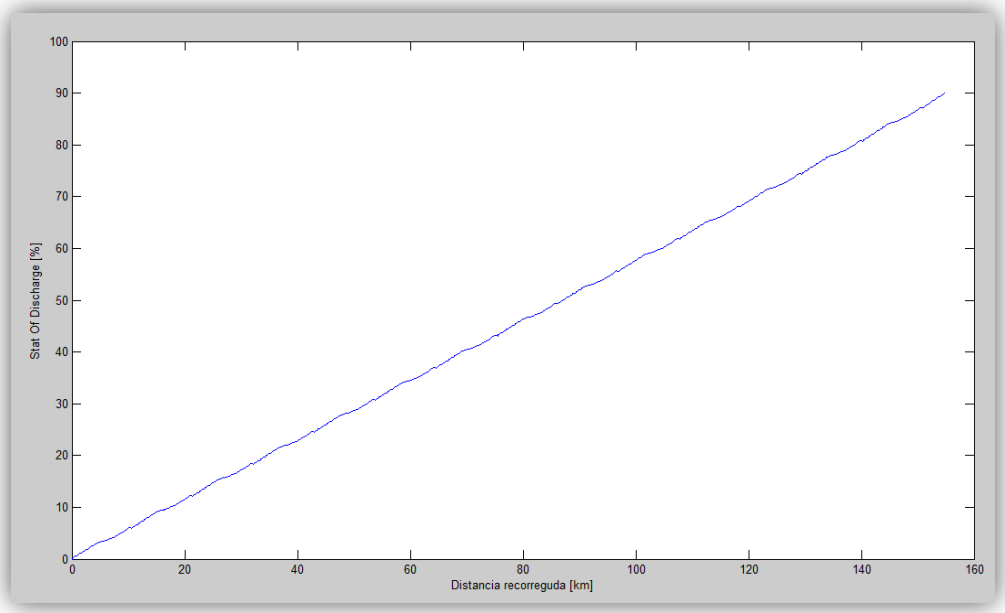


Figura 54. SOD vs. Distancia recorreguda en cicle NEDC (25ºC). (Elaboració pròpia)

Cal indicar que aquesta autonomia s'ha obtingut en unes condicions de simulació òptimes i amb un cicle de conducció desenvolupat en terreny completament pla.

A continuació es simularan diferents escenaris de funcionament del vehicle per poder tenir una visió més amplia dels aspectes que afecten el valor final d'autonomia en un vehicle elèctric.

Influència de la conducció

El cicle de conducció utilitzat per aquesta simulació, és el cicle que s'acostuma a utilitzar a Europa per homologar consums en vehicle elèctrics, però és un cicle que dista molt de la realitat de conducció dels usuaris, ja que per exemple no es té en compte l'estat del conductor i la seva forma de conduir.

El que s'hauria de fer en aquest cas, és simular diferents cicles de conducció per veure com afecten a l'autonomia, però això no es durà a terme perquè l'objectiu principal d'aquest projecte és avaluar l'autonomia segons el cicle NEDC, per poder establir una comparativa amb altres vehicles elèctrics existents al mercat.

De manera que en aquesta simulació, no es podrà avaluar l'efecte que té el comportament del conductor en l'autonomia, però si que es vol deixar clar que aquest aspecte és important i s'ha de tenir en compte en un possible disseny més acurat i de major precisió.

Influència de la temperatura

Com ja s'ha indicat, el model de la bateria reprodueix l'efecte que té la temperatura interna sobre el seu potencial als borns. A mesura que passa el temps i en funció de la intensitat de descàrrega a la qual està sotmesa es genera calor del qual una part s'acumula a la massa de la bateria i l'altre part s'allibera a l'ambient.

Per observar l'impacte que té la temperatura en l'autonomia s'ha simulat el vehicle realitzant un cicle complet de descàrrega a diferents temperatures tal i com mostra la següent gràfica.

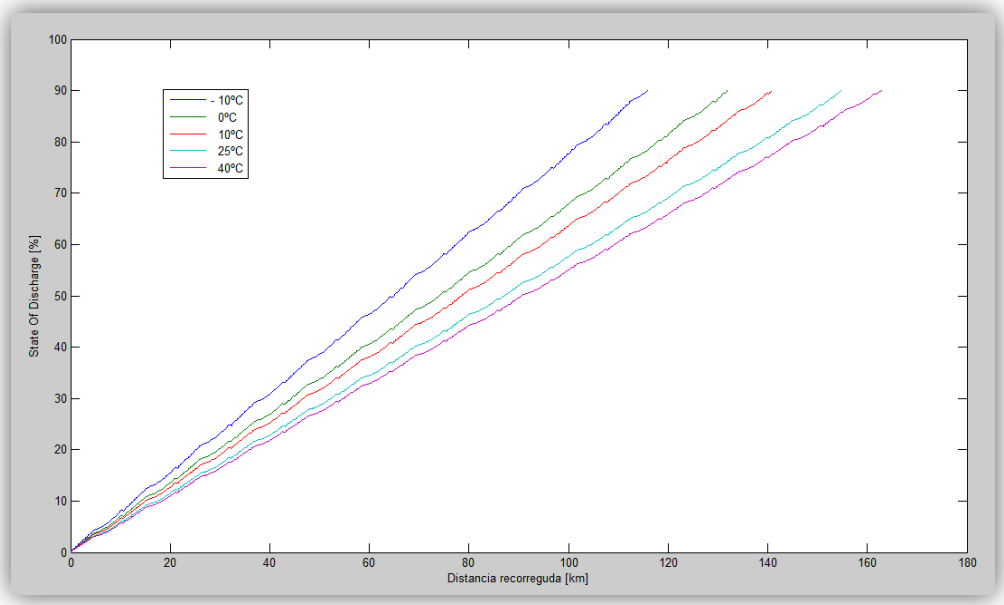


Figura 55. SOD vs. Distancia recorreguda en funció de la temperatura ambient. (Elaboració pròpia)

Els valors d'autonomia obtinguts es presenten a la taula següent:

Temperatura ambient [ºC]	Autonomia [km]
-10	115,95
0	131,93
10	140,88
25	154,78
40	162,96

Taula 9. Autonomia del vehicle en funció de la temperatura ambient. (Elaboració pròpia)

El cas on la temperatura ambient es fixa en 40ºC, segons els resultats, sembla ser la temperatura a la qual la bateria ofereix major quantitat d'energia emmagatzemada, però el contrapunt és que això també origina una degradació excessiva a la bateria si es descarrega a temperatures elevades amb certa freqüència. També es pot apreciar l'efecte del fred en el rendiment de la bateria, ja que implica una reducció important de l'autonomia.

Aquests resultats estan condicionats al règim de transferència de calor de la bateria a l'entorn. Els fabricants de les bateries no ho acostumen a declarar a les dades tècniques perquè és un paràmetre difícilment mesurable.

Cal indicar que aquests resultats d'autonomia no contemplen l'ús del sistema de climatització, ja que això suposaria una reducció important en l'autonomia tal i com es veurà més endavant.

Influència de la massa

La massa del vehicle objecte d'aquest projecte és molt baixa perquè es tracta d'un vehicle de dimensions reduïdes i apte per a només dues persones. Aquest paràmetre afecta tant a la capacitat d'acceleració com a l'autonomia, i és per això que es vol comprovar l'efecte que tindria una disminució del pes del vehicle.

Per mesurar l'efecte d'aquest factor s'ha simulat el vehicle amb la seva massa de 750kg i un segon i tercer cas amb una massa de 650kg i 850kg respectivament. La simulació es realitza amb el cicle de conducció NEDC i a 25ºC de temperatura ambient.

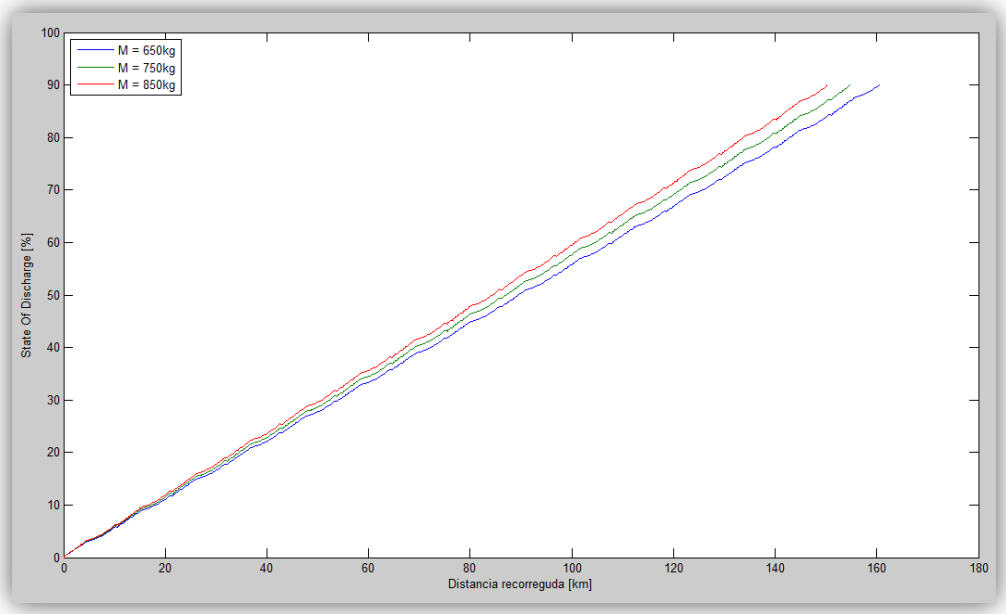


Figura 56. SOD vs. Distancia recorreguda en funció de la massa del vehicle. (Elaboració pròpia)

Els valors d'autonomia obtinguts es presenten a la taula següent:

Massa del vehicle [kg]	Autonomia [km]
650	160,61
750	154,78
850	150,27

Taula 10. Autonomia del vehicle en funció de la seva massa. (Elaboració pròpia)

Els resultats obtinguts indiquen que una reducció del pes del vehicle en 100kg, representa una millora en l'autonomia de prop de 6km, el que suposa un increment proper al 4%. Contràriament, un increment del pes del vehicle també de 100kg redueix l'autonomia en uns 4km, el que suposa un 3% menys.

Influència de la regeneració

L'efecte de la regeneració en la frenada té per objectiu recuperar l'energia cinètica i tornar a convertir-la en energia elèctrica i retornar-la a la bateria. Però igual que en el procés de tracció hi ha unes pèrdues, en la frenada regenerativa també hi són i en major quantitat, ja que el sistema està dissenyat per ser utilitzat en tracció i no tant en frenada regenerativa.

Però les principals pèrdues no es troben a l'interior del vehicle sinó en la interacció d'aquest amb l'asfalt i amb l'aire. És aquí on es dissipa la majoria de l'energia i per tant no és recuperable. Per tant, quan més pes tinguin les forces de fregament i de resistència aerodinàmica sobre les de superació de desnivells i d'inèrcia, majors seran aquestes pèrdues energètiques i menys quantitat d'energia serà possible recuperar.

Per caracteritzar el fenomen de regeneració es simulen dos casos. En el primer cas s'utilitza un factor de regeneració del 64% i en el segon cas s'anul·la l'efecte regenerador. A la següent figura es poden veure els resultats

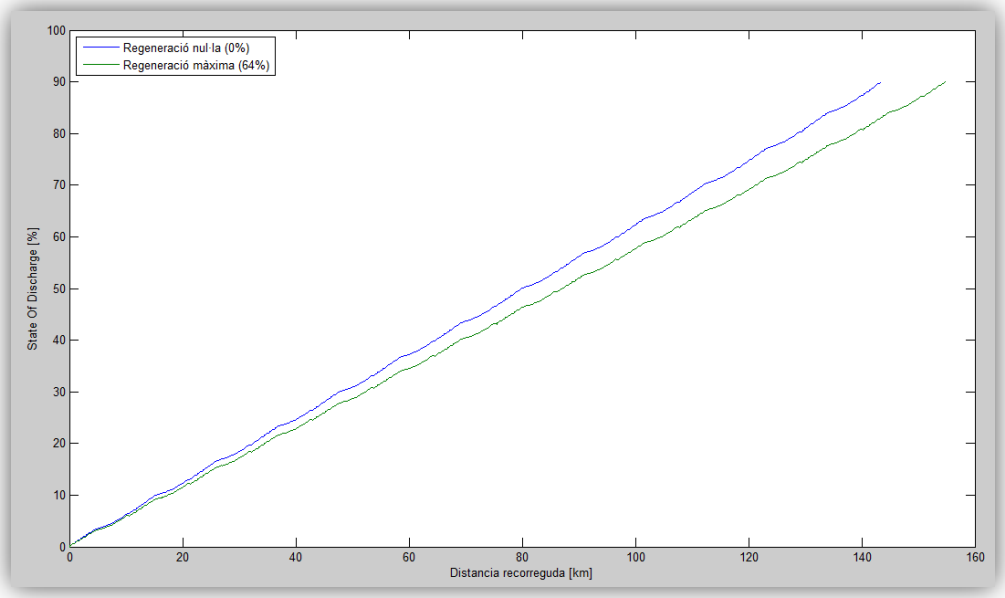


Figura 57. SOD vs. Distancia recorreguda en funció de la capacitat de regeneració. (Elaboració pròpia)

Els valors d'autonomia obtinguts es presenten a la taula següent:

Capacitat de regeneració [%]	Autonomia [km]
0%	143,45
64%	154,78

Taula 11. Autonomia del vehicle en funció de la capacitat de regeneració. (Elaboració pròpia)

La influència de l'efecte regeneratiu durant la frenada és d' un 7% sobre l'autonomia aconseguida amb regeneració màxima, el que suposa pràcticament 11km més d'autonomia.

Influència dels sistemes auxiliars

Seguidament es recull una estimació dels consums elèctrics dels sistemes auxiliars dels que disposa el vehicle (8).

Sistema Auxiliar	Consum [W]	Factor d'utilització	Consum total [W]
Climatització	1000	-	1.000
Llums	400	-	400
Radio	50	-	50
Refrigeració de l'electrònica i el motor	800	100%	800
Refrigeració de la bateria	800	80%	640
Frens	500	50%	250
Direcció assistida	700	60%	420
Total			**3.560**

Taula 12. Taula de consum dels sistemes auxiliars. (Elaboració pròpia)

De tots els consums esmentats, n'hi ha que són imprescindibles per al correcte funcionament del vehicle, com serien la refrigeració de l'electrònica, el motor i la bateria, i l'accionament del sistema de frens i la direcció assistida. Aquests sistemes, amb l'excepció de la refrigeració de l'electrònica i el motor, no s'utilitzen de forma permanent, de manera que per aproximar el consum real s'introdueixen els factors d'utilització indicats a la taula.

La climatització, la radio i les llums serien prescindibles per fer funcionar el vehicle, de manera que per a una homologació del cotxe no es tindrien en compte els seus consums.

Per analitzar l'impacta que el consum d'aquests sistemes té sobre l'autonomia del vehicle, es realitza la simulació del que s'ha considerat dos casos extrems. El més favorable correspondria a un dia de temperatures agradables, on no caldria la utilització del sistema de climatització, i amés ni la radio ni la il·luminació estan

en funcionament. Això suposa un consum dels sistemes auxiliars de 2.110 W, que és la potència necessària per fer funcionar els sistemes imprescindibles.

El segon cas extrem, i més desfavorable, correspondria a la circulació durant la nit, amb necessitat d'accionar el sistema de climatització i amés utilitzant la radio. Això suposa el consum màxim dels sistemes auxiliars que és de 3.560 W.

Els resultats obtinguts es mostren a la següent gràfica.

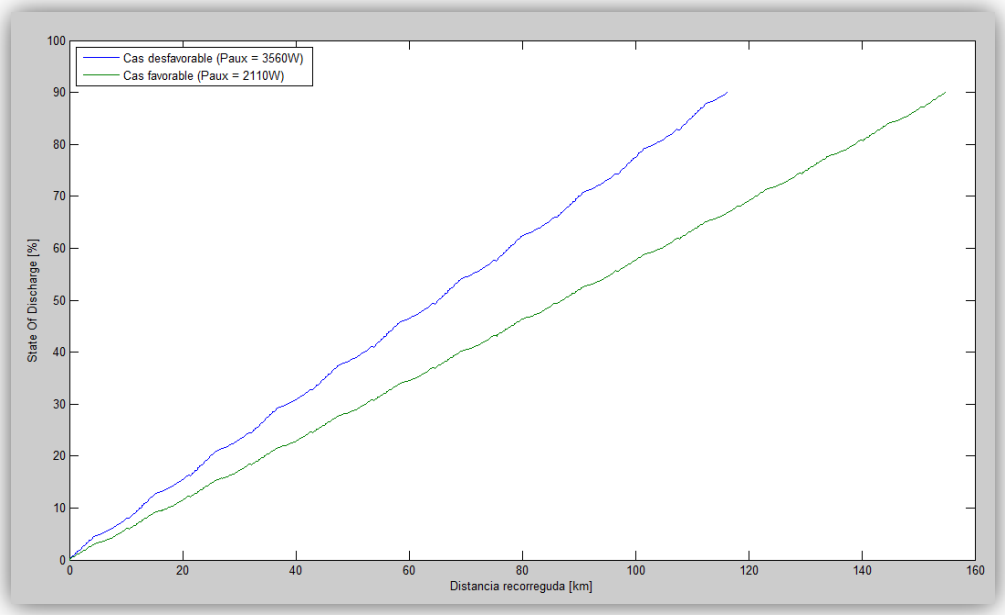


Figura 58. SOD vs. Distancia recorreguda en funció del consum dels sistemes auxiliars. (Elaboració pròpia)

Els valors d'autonomia obtinguts es presenten a la taula següent:

Consum sistemes auxiliars [W]	Autonomia [km]
2110	154,78
3560	116,32

Taula 13. Autonomia del vehicle en funció del consum dels sistemes auxiliars. (Elaboració pròpia)

Com es pot comprovar, el consum elèctric dels sistemes auxiliars és un factor molt important a tenir en compte alhora de definir l'autonomia final del vehicle. Tal i com mostra la taula, el fet d'accionar els sistemes considerats prescindibles suposa una reducció de la distància recorreguda de 38 km, que representen una reducció de l'autonomia propera al 25%. Si veiem el consum energètic destinat a

la tracció del vehicle i el destinat a alimentar els sistemes auxiliars, veiem que per al segon cas s'utilitzen 12,7kWh dels 20kWh de capacitat de que disposa la bateria, el que suposa un 63,5% de l'energia total emmagatzemada.

6.2.7. CONSUM ENERGÈTIC DEL VEHICLE

L'energia consumida per el vehicle és exactament l'energia emmagatzemada a les bateries i que és de 20kWh. Per a unes condicions normals de simulació com les definides a l'apartat anterior, sense tenir en compte els efectes que poden influir en el resultat final, l'autonomia resultant és de 154,78 km. El consum energètic en el tram del dipòsit a les rodes, és a dir sense considerar la font de producció de l'energia i la seva eficiència es mostra a la següent expressió:

$$\frac{20\ kWh}{154{,}78\ km} = 0{,}129\ {}^{kWh}/_{km} \rightarrow 12{,}9\ {}^{kWh}/_{100km} \qquad \text{(Eq. 59)}$$

El consum energètic del vehicle és de 12,9 kWh/100km.

Segons la informació mostrada al annex 1, on s'ha fet un recull de les dades més característiques dels vehicles elèctrics existents al mercat, el consum energètic mitjà es situa en torn als 12,8 kWh/100km, de manera que el vehicle objecte d'aquest projecte es situaria lleugerament per sobre d'aquest consum mitjà. En canvi, respecte als consums dels vehicles del segment A, les dades dels quals també es mostren al mateix annex, aquest vehicle tindria un consum gairebé 4 vegades inferior a la mitjana.

7. DISPOSICIÓ DELS COMPONENTS DEL BEV

Com es veurà més endavant, una part important d'aquest projecte consisteix en el dimensionat i el disseny exterior del vehicle, bàsicament amb l'objectiu de minimitzar l'efecte que té la resistència aerodinàmica en el consum del vehicle elèctric. Interiorment el vehicle no s'ha definit, però en aquest apartat si que es vol introduir la possible ubicació que tindrien els components que formen part de la plataforma de tracció com serien el conjunt motor-controlador, la bateria, els components d'electrònica de potència i el diferencial.

En primer lloc, el vehicle objecte d'aquest projecte es tractaria d'un vehicle de tracció davantera i s'ha suposat un repartiment de pesos proper a un 60% sobre l'eix davanter i el 40% restant sobre l'eix posterior.

A les següents imatges es pot veure la distribució realitzada a partir de la ubicació dels dos ocupants del vehicle.

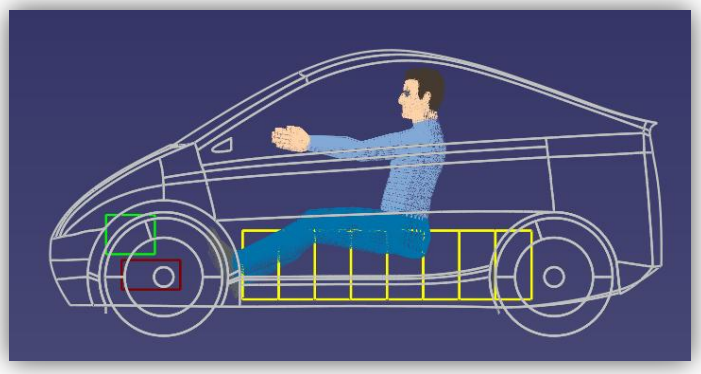


Figura 59. Distribució dels components del BEV. Vista lateral.

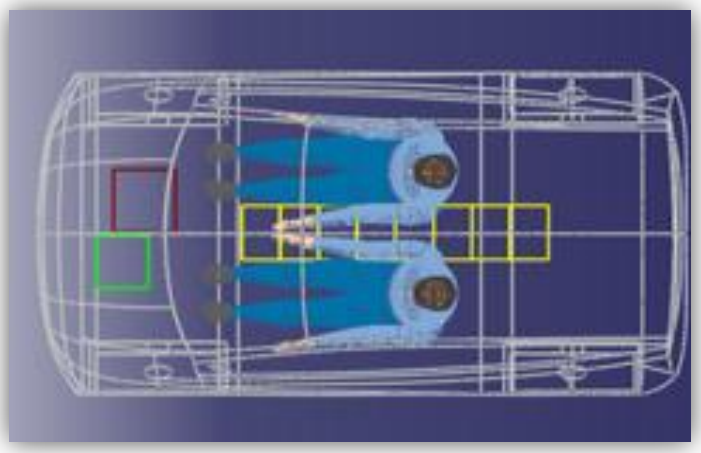


Figura 60. Distribució dels components del BEV. Vista en planta.

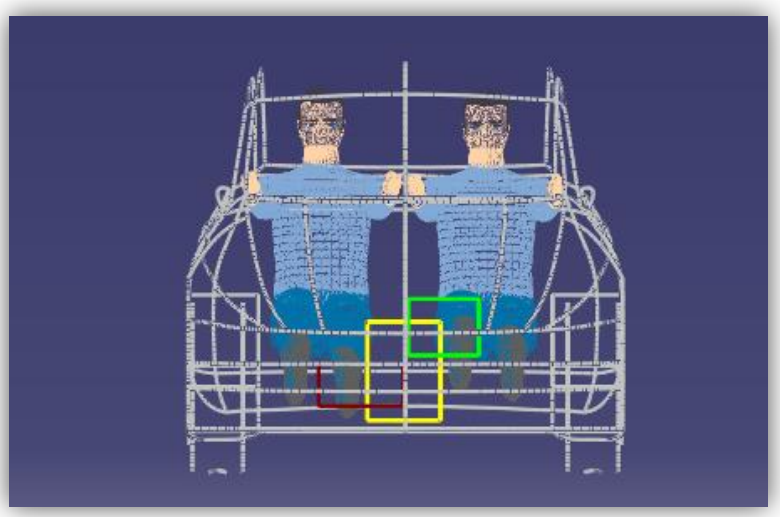


Figura 61. Distribució dels components del BEV. Vista frontal.

Els dos ocupants representen un percentil 90 de la població mundial, per tal de visualitzar el cas més desfavorable possible i assegurar que les dimensions són adequades.

El mòdul de les bateries, que estaria representat pels blocs de color groc, es col·locarien a la zona central del vehicle en disposició longitudinal. El mòdul que s'ha simulat, representa les dimensions reals d'una bateria de 20kWh proveïda pel fabricant KOKAM. Aquest mòdul té una longitud total de 1480mm, una amplada de 260mm i una alçada de 350mm. El centre del mòdul es situarà a una distancia aproximadament de 1400mm de l'eix davanter.

EL conjunt format pel motor elèctric i el seu controlador així com l'electrònica de potència, es representa pel bloc de color verd. Aquest bloc té les dimensions del motor comercial PowerPhase 75 del fabricant UQM, que són de 150x150x250mm i es situaria a la zona davantera, adjacent al diferencial, sobre l'eix davanter.

El diferencial, que es representa per el bloc vermell, té unes mides aproximades. Aquest bloc es localitzaria a l'eix davanter, degut a que és l'eix tractor.

La posició dels blocs bàsics de la plataforma de tracció, respondria a un repartiment de la massa del vehicle proper al 60% sobre l'eix davanter i un 40% sobre l'eix posterior.

8. DISSENY EXTERIOR DEL VEHICLE

8.1. OBJECTIUS DEL DISSENY

Com s'ha comentat a la introducció d'aquest projecte, un dels aspectes que es pretén desenvolupar és el disseny exterior del vehicle. Principalment aquest disseny ha de complir dos requisits.

En primer lloc, la optimització del coeficient de resistència aerodinàmica (C_X) per tal de reduir les pèrdues produïdes per la fricció amb l'aire i millorar el consum energètic del cotxe. Degut a que es vol dissenyar un vehicle de dimensions reduïdes, amb una longitud inferior als 3,5m. Això presenta una dificultat afegida, ja que la major longitud d'un vehicle té un efecte positiu en el valor final del C_X, de manera que s'haurà d'intentar obtenir un bon C_X amb una longitud reduïda.

Finalment, es pretén que el disseny final presenti un aspecte atractiu de cara a l'usuari. Per assolir aquest objectiu, s'intentarà desenvolupar un cotxe amb una forma exterior similar als vehicles actuals, i evitant la introducció de formes futuristes que puguin generar rebuig. La valoració d'aquest últim punt, es farà en base a un criteri bàsicament subjectiu.

8.1.1. OPTIMITZAZIÓ DEL Cx

La resistència aerodinàmica és la força que s'oposa a l'avanç d'un cos a través de l'aire, i sempre actua en sentit oposat a la velocitat relativa del cos respecte del mitjà. De forma anàloga, es pot considerar la resistència aerodinàmica com la fricció de l'aire amb el cos, que en aquest cas és el vehicle. L'expressió matemàtica de la resistència aerodinàmica és:

$$R_A = C_X \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot A \cdot v^2 \qquad \text{(Eq. 60)}$$

On ρ_{aire} és la densitat de l'aire en kg/m^3, v és la velocitat de desplaçament del cotxe en m/s i A és l'àrea de referència del vehicle en m^2. La raó per la qual s'escull la superfície frontal com a area de referència en els cotxes, és que se suposa que per darrere del plànol de major àrea és on es produeix la separació del flux aerodinàmic de la carrosseria. Aquesta separació del flux és la principal causa de resistència aerodinàmica en el cotxe de producció.

Per reduir aquesta resistència aerodinàmica, s'ha d'intentar que tant l'àrea frontal com el C_X siguin mínims.

El C_X, també anomenat coeficient de penetració, és l'expressió de la resistència que ofereix un cos en moure's a través de l'aire, degut a la seva forma i la seva expressió matemàtica és la següent:

$$C_X = \frac{R_A}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot A \cdot v^2} \qquad \text{(Eq. 61)}$$

On R_A és la resistència real que experimenta el cos respecte a la resistència teòrica.

La següent imatge, mostra valors representatius del C_X per a diferents formes.

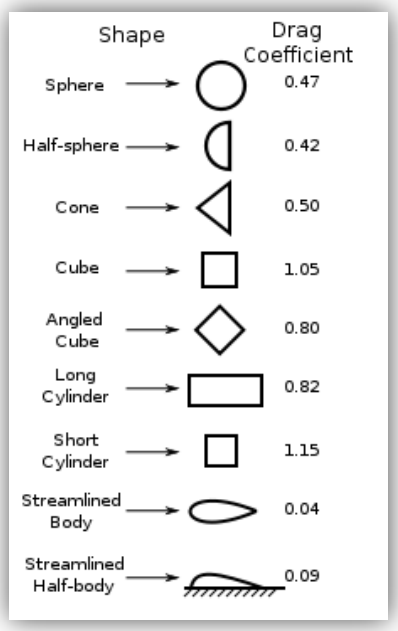


Figura 62. Valor d'alguns Cx segons la forma del cos. (Font: Wikipedia)

A la majoria de cotxes de producció, el C_X presenta un valor entre 0,25 i 0,40. La següent taula mostra el C_X de diferents vehicles actuals:

C_x	Vehicle	Any	C_x	Vehicle	Any
0,195	General Motors EV1	1996	0,29	Toyota Yaris	2006-2011
0,22	Tesla Model S	2012	0,31	Audi A5/S5	2011-present
0,25	Audi A2	2001	0,31	Mazda3 (Hatchback)	2010
0,25	Toyota Prius	2010	0,31	Toyota RAV4	2006
0,27	Opel Insignia	2008–present	0,32	Porsche 997 GT2	2008–present
0,28	Citroën C4	2004	0,32	Volkswagen Golf V GTI	2006
0,28	Nissan Leaf	2011	0,33	Audi A3	2006
0,281	Chevrolet Volt	2010	0,35	MINI Cooper	2008
0,29	Audi A4/S4	2011-present	0,35	Tesla Roadster	2008
0,29	Mazda3	2010	0,36	Honda Civic	2001–2005

Figura 63. Cx de diferents models d'automòbils actuals. (Font: Wikipedia)

Per al vehicle del projecte que ens ocupa, l'objectiu de disseny es marca en aconseguir un valor de C_X que sigui inferior a 0,35. Com es pot veure a la taula següent, els C_X que presenten els vehicles del segment A analitzats a l'apartat 3.2, que tenen unes dimensions similars al vehicle que es vol desenvolupar, es troben per sota de 0,35.

Cx	VEHICLE	Cx	MODEL
0,29	TOYOTA Yaris 3p 70 Live	0,33	FIAT 500 Pop 1.2
0,30	PEUGEOT 107 3p Active 1.0	0,34	CITROEN C1 3p 1.0i 12v
0,30	TOYOTA iQ 1.0 VVT-i	0,34	FORD KA Urban 1.20 Duratec
0,30	SUZUKI Alto GL	-	SMART fortwo coupé 45
0,31	KIA Picanto 3p 1.0 Basic	-	TOYOTA Aygo 3p 70 Live
0,32	VW up! 2p Move up! 1.0	-	NISSAN Pixo Visia 1.0
0,32	HYUNDAI i10 1.1 Classic	-	SEAT Mii 1.0 12V

Figura 64. Cx dels vehicles analitzats a l'apartat 3.2. (Font: www.km77.com)

Cal indicar que les condicions en les que s'han mesurat els C_X d'aquests vehicles no són les mateixes que s'utilitzaran en aquest projecte. En primer lloc s'ha de tenir en compte que a la geometria del model objectiu d'aquest projecte, no s'han representat els elements de refrigeració del vehicle, ni les unions entre els diferents elements que formen la carrosseria del vehicle, ni tampoc s'han modelitzat les llantes. Tots aquests aspectes afecten el valor final del C_X. En segon lloc, val a dir que en un vehicle de producció, el coeficient aerodinàmic es mesura en un túnel de vent i utilitzant el vehicle real, de manera que el mètode utilitzat és molt més empíric i els resultats obtinguts seran molt més propers a la realitat que utilitzant CFD, el qual es basa en models 100% teòrics.

8.2. PROCÉS DE DISSENY DEL VEHICLE

Definits els objectius que es volen assolir en el disseny, el següent pas és escollir el software per realitzar el desenvolupament. El programa que s'utilitzarà és el CATIA V5[22], un programa àmpliament usat en la indústria de l'automòbil per al disseny i desenvolupament de components de carrosseria.

CATIA V5 és un software basat en el disseny paramètric. El disseny paramètric, explicat d'una forma ràpida, és un conjunt d'objectes de dibuix que contenen únicament la geometria del dibuix i que és controlada per les relacions geomètriques i dimensions del conjunt. Amb un disseny paramètric, l'usuari pot canviar el valor d'una restricció dimensional y la geometria del conjunt s'ajusta d'acord amb aquest nou valor i amb les restriccions geomètriques existents.

CATIA V5 disposa d'una gran varietat de mòduls que s'agrupen en tallers de treball i que fan que els camps d'aplicació del programa siguin molt amplis. Per al disseny del vehicle, s'utilitzaran els següents mòduls:

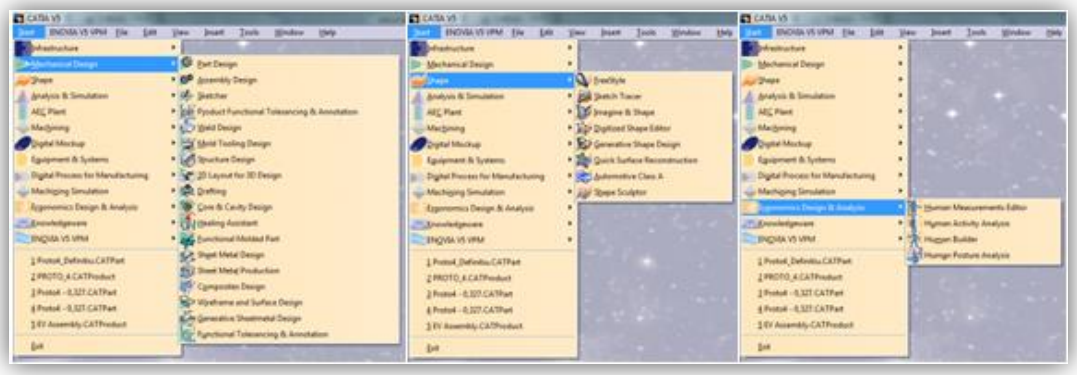


Figura 65. Mòduls utilitzats durant el disseny.

Freestyle

Aquest mòdul ofereix múltiples eines per a la generació i tractament de superfícies complexes. Disposa d'una eina que permet realitzar corbes 3D, i que s'utilitzarà per dissenyar l'esquelet de l'estructura exterior del vehicle que servirà de guia per generar les superfícies..

Generative shape design

Aquest mòdul igual que el Freestyle, també ofereix múltiples eines per desenvolupar superfícies, però a diferència del Freestyle, aquestes superfícies

[22] *CATIA - Computer-Aided Three dimensional Interactive Application.*

són més convencionals. Aquest mòdul s'utilitzarà per generar les superfícies que determini l'estructura definida amb el mòdul Freestyle.

Human builder

Mòdul que permet realitzar càlculs ergonòmics. En aquest cas s'utilitzarà per simular la posició dels usuaris dintre el vehicle i comprovar que les dimensions interiors són suficients.

Assembly design

Aquest mòdul disposa de les eines necessàries per realitzar l'assemblatge de les peces que formen el conjunt. S'utilitzarà per assemblar els maniquins que simulen els usuaris a l'interior del vehicle.

La metodologia de treball que s'ha seguit per al desenvolupament del disseny del vehicle que ens ocupa, consta principalment de tres passos principals, els quals s'expliquen a continuació.

8.2.1. CONFIGURACIÓ DE LES IMATGES DE REFERENCIA

El primer que s'ha fet abans de començar a dissenyar el cotxe, és configurar les imatges que serviran de referència per començar a traçar les línies 3D. El procés es basa en escollir les imatges del vehicle que es vol utilitzar de referència i distribuir-les en un espai de treball com mostra la següent imatge.

Figura 66. Imatges de referència del Nissan Invitation.

En aquest cas, s'han utilitzat les vistes frontal, posterior, lateral i zenital del prototip Nissan Invitation. L'elecció d'aquest model en concret és un aspecte

indiferent perquè les imatges de referència només s'han utilitzat per equilibrar les proporcions del vehicle. Aquestes imatge han estat adaptades a les dimensions que es desitgen al vehicle a dissenyar.

8.2.2. DIBUIX DE L'ESTRUCTURA DEL VEHICLE

Una vegada es tenen les referències, ja es poden començar a traçar les línies que definiran l'esquelet del vehicle, sobre el qual es generarà la superfície exterior. Aquest procés s'ha realitzat bàsicament a partir de corbes 3D mitjançant el mòdul *Freestyle.* A continuació es mostren les imatges de l'esquelet final del vehicle.

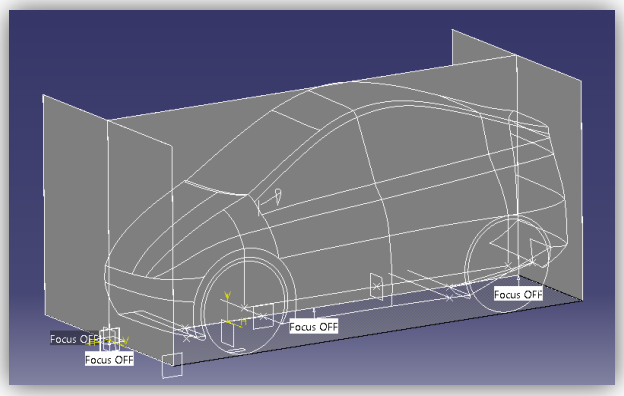


Figura 67. Esquelet final del vehicle.

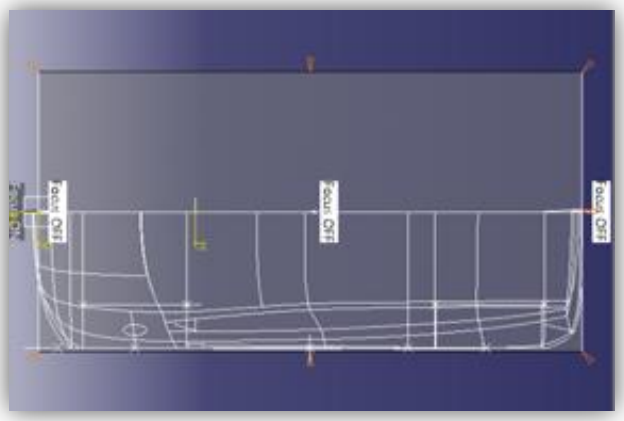


Figura 68. Imatge zenital de l'esquelet del vehicle.

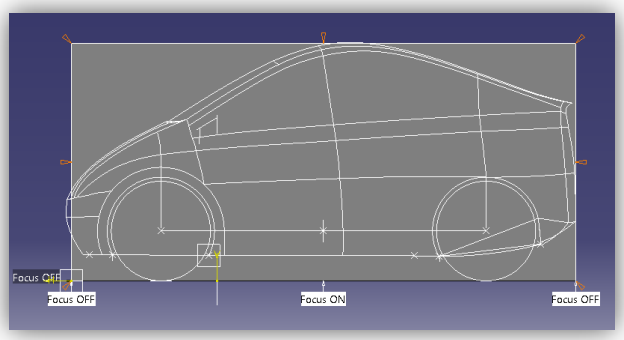


Figura 69. Imatge lateral de l'esquelet del vehicle.

Amb l'esquelet definit, el següent pas, i definitiu, és generar la superfície exterior.

8.2.3. GENERACIÓ DE LES SUPERFICIES

La generació de la superfície exterior s'ha fet a partir de les diferents eines que ofereix el mòdul *Generative Shape Design*. Per cobrir tot el vehicle, en primer lloc s'han generat totes les superfícies d'un dels costats per posteriorment generar l'altre part mitjançant simetria, d'aquesta forma es garanteix que ambdós costats són iguals. El resultat final de tot el procés es mostra a continuació.

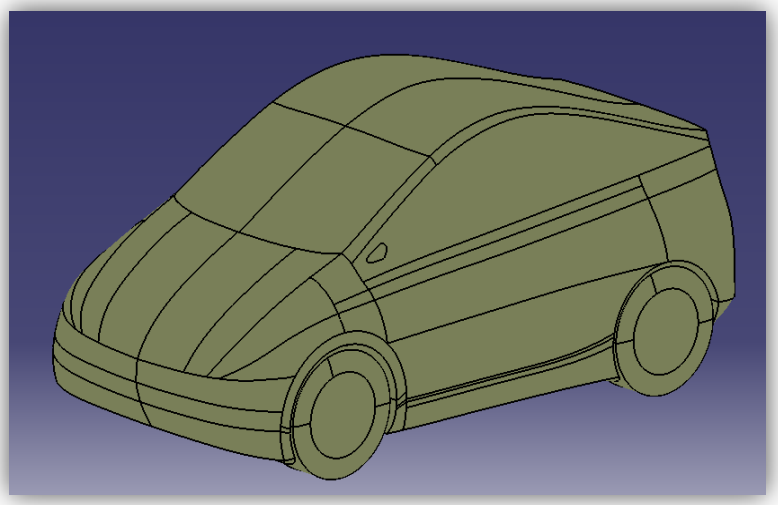


Figura 70. Disseny final del vehicle.

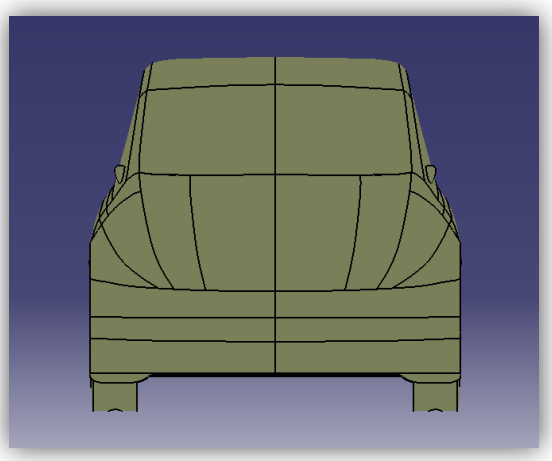


Figura 71. Vista frontal del disseny final.

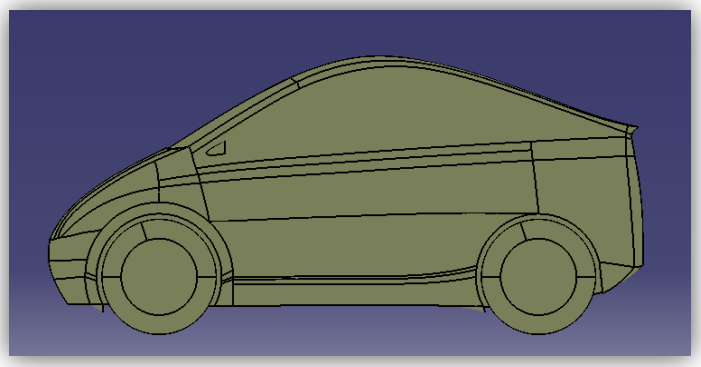


Figura 72. Vista lateral del disseny final.

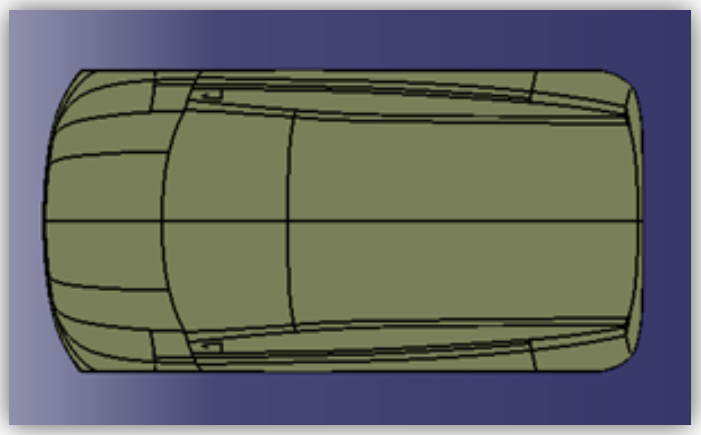


Figura 73. Vista zenital del disseny final.

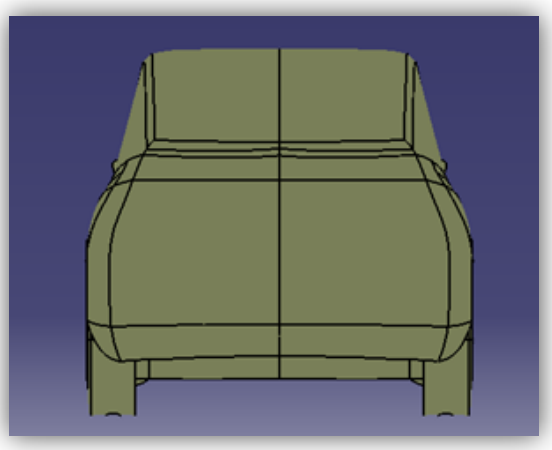


Figura 74. Vista posterior del disseny final.

9. DINÀMICA DE FLUIDS COMPUTACIONAL (CFD)

9.1. INTRODUCCIÓ CFD

La dinàmica de fluids computacional o CFD és la tècnica, que intenta utilitzar els ordinadors per a la simulació del moviment dels fluids i, d'altres fenòmens associats com transferència de calor, reaccions químiques, arrossegament de sòlids, etc.

Els programes de CFD existents al mercat són prou potents i fàcils d'utilitzar com perquè resulti rendible la seva utilització a nivell industrial. Els seus beneficis vénen principalment de la reducció del nombre d'assajos experimentals necessaris i del temps de desenvolupament.

També poden proporcionar molta informació complementària del comportament detallat, que resulta molt difícil conèixer experimentalment. Un valor afegit és poder posar al producte l'etiqueta de "Dissenyat amb ajuda de l'ordinador", i la facilitat per generar dibuixos espectaculars, que estimulen la "compra" del producte.

Amb la proliferació de programes comercials, un nombre creixent de tècnics ha entrat en contacte amb aquests mètodes. No obstant això, freqüentment no es coneixen bé les característiques que té el CFD, i per això, els resultats als quals s'arriben poden no ser correctes ni útils. Per això, s'ha fet molt important per al maneig del CFD, la formació en dinàmica de fluids i el coneixement de la filosofia, capacitats i limitacions del sistema.

El software de CFD busca el càlcul detallat del moviment dels fluids mitjançant la utilització de l'ordinador, per a la resolució de les equacions matemàtiques que expressen les lleis per les quals es regeixen.

Als resultats d'aquestes tècniques, juntament amb el moviment i la pressió, es poden obtenir les variacions de les propietats, les forces que exerceixen sobre els sòlids adjacents, els intercanvis d'energia, etc.

Alguns dels camps d'aplicació del CFD són:

- Aerodinàmica de vehicles terrestres, avions, entrada i sortida de l'atmosfera de vehicles espacials.
- Disseny de motors de combustió, calderes, turbomàquines (bombes, ventiladors, compressors, turbines, etc.)
- Refrigeració d'equips elèctrics i electrònics.
- Equips per a processos físics i químics: reactors, sedimentadors, mescladors, bescanviadors, etc.

- Desenvolupament de sistemes de ventilació, calefacció i aire condicionat.
- Predicció meteorològica.
- Influència del vent sobre edificis, ponts, etc.
- Dispersió de contaminants en l'atmosfera, rius i mars.
- Biomedicina: respiració i circulació de la sang.
- Hidrologia i oceanografia: corrents en rius, estuaris i oceans.
- Hidrodinàmica de vaixells.

En general, són casos en els quals és necessari entrar en els detalls de la dinàmica de fluids per obtenir els resultats que es busquen.

9.1.1. AVANTATGES I INCONVENIENTS

Fins a finals dels 60, els ordinadors no van aconseguir velocitats de càlcul suficients per resoldre casos senzills, com el flux laminar al voltant d'un obstacle. Abans d'això, l'experimentació constituïa el mitjà bàsic de càlcul i desenvolupament.

A l'actualitat, els assajos experimentals segueixen sent necessaris per a la comprovació de dissenys no excessivament complexos. Els continus avanços en els ordinadors i algorismes, permeten una reducció important en el nombre d'assajos necessaris. El disseny típic d'un model d'ala d'avió, es fa ara amb 3 o 4 assajos al túnel de vent, en comptes dels 10 o 15 que eren necessaris anteriorment.

Els avantatges que proporciona l'anàlisi per CFD es poden resumir en:

- Reducció substancial de temps i costos en els nous dissenys.
- Possibilitat d'analitzar sistemes o condicions molt difícils de simular experimentalment: velocitats hipersòniques, temperatures molt altes o baixes, moviments relatius, etc.
- Capacitat d'estudiar sistemes sota condicions perilloses o més enllà de les seves condicions límit de funcionament, per exemple accidents.
- Nivell de detall pràcticament il·limitat. Els mètodes experimentals són tant més cars com més gran és el nombre de punts de mesura, mentre que els codis de CFD poden generar un gran volum de resultats sense cost afegit, i és molt fàcil fer estudis paramètrics.

Les tècniques de CFD no són barates. En primer lloc, són necessàries màquines de gran capacitat de càlcul (els investigadors de CFD són usuaris habituals dels ordinadors més potents que existeixen), i un software amb un preu encara no accessible al gran públic.

En segon lloc, es necessita personal qualificat que sigui capaç de fer funcionar els programes i analitzar adequadament els resultats.

Els desenvolupaments en el camp del CFD s'estan apropant cada vegada més als d'altres eines de CAE com les d'anàlisis d'esforços en sòlids i estructures. El motiu del retard és la gran complexitat de les equacions i, sobretot, la dificultat de modelitzar adequadament la turbulència.

El major inconvenient del CFD consisteix en que no sempre és possible arribar a obtenir resultats suficientment precisos, i la facilitat de cometre greus errors. Això prové de:

- La necessitat de simplificar el fenomen a estudiar perquè el maquinari i programari sigui capaç de tractar-ho. El resultat serà tant més precís com més adequades hagin estat les hipòtesis i simplificacions realitzades.
- La limitació dels models existents per a la turbulència, flux bifàsic, combustió, etc.

9.1.2. RESUM DEL MÈTODE

Considerant, per exemple, el flux de l'aire al voltant d'un cotxe. En teoria, amb les equacions de Navier-Stokes, es pot calcular la velocitat i la pressió de l'aire en qualsevol punt (en un cas de flux compressible o en el qual hi hagi transferència de calor, també són variables a considerar la temperatura i la densitat). Això permet calcular la resistència aerodinàmica, l'adherència al sòl dels alerons o faldons davanters, l'adequada col·locació de les preses d'aire, etc.

Juntament amb les equacions, cal utilitzar les condicions inicials i de contorn referents a les variables i les referents a la superfície sòlida. En aquest cas, les condicions referents a les variables, vénen definides per la velocitat del cotxe i la pressió, que serà igual a l'atmosfèrica en els punts suficientment allunyats. Les condicions de les superfícies sòlides vénen definides per la forma, expressada matemàticament a les coordenades adequades.

Per resoldre les equacions, el programa transformarà les equacions diferencials en equacions algebraiques, i les resoldrà únicament en un nombre finit de punts de l'espai. Per això, el primer que cal fer és representar el vehicle o, mes bé, el seu entorn mitjançant una malla de càlcul. Com més gran sigui el nombre de punts d'aquesta malla, major serà la precisió i realisme de la simulació, i més difícil de generar i resoldre. En casos amb geometria complicada, aquesta fase pot ocupar dies i fins i tot setmanes.

9.2. RESOLUCIÓ NUMÈRICA DE LES ECUACIONS DE FLUX

Les equacions que defineixen en qualsevol punt de l'espai la velocitat i pressió d'un fluid van ser descobertes a principis del segle XIX per l'enginyer francès Claude Navier i el matemàtic irlandès George Stokes. Aquestes equacions es deriven directament de les lleis del moviment de Newton, i són equacions diferencials en derivades parcials. Les equacions són les mateixes per a qualsevol situació de flux de fluids. La particularització als casos concrets ve definida per les condicions de contorn i els valors inicials. Per exemple, els cossos sòlids submergits en un corrent, o actuant com a contorns exteriors definiran per exclusió la zona de l'espai en la qual cal resoldre les equacions, i introduiran condicions de contorn en la variable velocitat (velocitat nul·la a les parets).

Aquestes equacions són prou complicades com perquè la seva solució analítica només sigui possible en casos molt elementals. La utilització de l'ordinador per a la seva resolució numèrica és el que ha donat origen a la dinàmica de fluids computacional o CFD.

Fins i tot avui dia, la complexitat del càlcul i les limitacions dels súper ordinadors més potents, fan que sigui absurd intentar utilitzar les tècniques de CFD en els casos en els quals altres tècniques han aconseguit simplificacions adequades, com el càlcul de pèrdues de càrrega en canonades i canals, cop d'ariet, disseny de sistemes oleohidràulics i pneumàtics, etc. També resulten impracticables per a processos molt extensos, com pot ser la simulació global d'una planta química, una depuradora, o fins i tot un motor d'explosió o una turbina de gas en el seu conjunt (sí es poden estudiar per parts).

9.2.1. ECUACIONS DEL MOVIMENT DEL FLUX

Les equacions que descriuen un fluid en moviment es poden deduir de la llei de conservació de la massa, i de la llei de conservació de la quantitat de moviment. Aplicant aquestes lleis de conservació a un element de fluid, s'obtenen les equacions de Navier-Stokes. Simplificades per a un fluid incompressible són:

Equació de continuïtat:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \qquad \text{(Eq. 62)}$$

Equació de la quantitat de moviment:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla P + \rho g + \mu \nabla^2 \vec{v} \qquad \text{(Eq. 63)}$$

On ρ és la densitat, i μ és la viscositat del fluid. Resolent aquestes equacions, es troba la velocitat del fluid, i la pressió en qualsevol punt del domini estudiat.

Com es pot veure, són equacions diferencials en derivades parcials que només en problemes amb geometria i condicions de contorn senzilles poden ser resoltes de forma analítica.

Fins i tot en aquests casos, la solució que s'obté de manera analítica és la de flux laminar. Per desgràcia, habitualment cal comptar amb un altre factor: la turbulència, que fa que el flux real s'allunyi bastant de la solució laminar.

Per poder obtenir una solució en un cas amb flux turbulent complex, aquestes equacions han de ser resoltes per mètodes numèrics, amb ajuda de l'ordinador i utilitzant models de turbulència, que compliquen més, si cap, el procés.

9.2.2. MODELS DE TURBULÈNCIA

A la pràctica, gairebé tots els fluxos que interessen a científics i enginyers són turbulents.

Per entendre en què consisteix la turbulència poden resultar il·lustratius uns exemples corrents. En obrir una aixeta de cuina només una mica, l'aigua que flueix des de l'aixeta ho fa de manera suau i neta. Aquest flux es diu laminar. Si s'obre una mica més, el doll deixa de ser transparent i té una aparença turbulenta. El mateix es pot veure en el fum d'un cigarret encès amb l'aire en calma. En sortir del cigarret el flux és laminar. Una mica més amunt es transforma en ondulat i difús.

La turbulència es podria definir com un fenomen d'inestabilitat intrínseca del flux. Provoca que la fluid passi a comportar-se de forma aparentment caòtica. D'una manera descriptiva podria parlar-se de la formació de remolins més o menys aleatoris al voltant de la direcció mitjana del moviment. Sorgeix quan la velocitat del fluid supera un llindar específic, per sota del qual les forces viscoses esmorteeixen el comportament caòtic.

El mitjà que se sol utilitzar per determinar si un flux serà turbulent o no, és el número de Reynolds. Aquest número indica la relació, o la importància relativa, entre les forces inercials i les forces viscoses del corrent. Forces inercials grans en relació a les viscoses tendeixen a afavorir la turbulència, mentre que una

viscositat alta l'evita. Dit d'una altra manera, la turbulència apareix quan el nombre de Reynolds supera cert valor.

La turbulència no és un fenomen sempre indesitjable. Per exemple, als cilindres d'un motor de combustió interna, la turbulència millora la barreja del combustible i el comburent i produeix una combustió més neta i eficient. La capa límit turbulenta és més resistent al despreniment que la laminar, per això als avions d'aeromodelisme es busca aconseguir que el flux sobre les ales sigui turbulent de manera que puguin volar en circumstàncies més extremes sense entrar en pèrdua (en avions de major grandària no existeix aquest problema perquè el flux és sempre turbulent). Els forats de les pilotes de golf fan passar la capa límit a turbulenta a causa que al desprendre's més tard que la laminar, redueixen la grandària de l'estela, disminuint substancialment l'arrossegament. Amb això s'aconsegueix llançar la bola a més del doble de distància amb la mateixa força.

Els remolins, també anomenats vòrtex, que caracteritzen el flux turbulent són de diverses grandàries. Aquests vòrtex es formen i es desfan sense solució de continuïtat. Els remolins grans es trenquen en altres més petits, aquests en remolins més petits, i així successivament. Quan els remolins es fan prou petits, es dissipen en forma de calor a causa de la viscositat.

Les equacions de Navier-Stokes són una representació matemàtica adequada dels fluxos de fluids, fins i tot turbulents. No obstant això, la resolució d'aquestes equacions de manera que es calculi el flux turbulent requereix una discretització temporal i de la malla de càlcul tan detallada que a la pràctica resulta inviable.

Per aconseguir això, les equacions de Navier-Stokes es basen en el valor mig sobre les escales de les fluctuacions de turbulència. A la pràctica, això significa que no s'acostuma a calcular el moviment de tots i cadascun dels petits remolins. Sinó que es calculen els remolins grans i s'utilitzen models de turbulència per estimar els efectes dels petits remolins sobre els grans. Aquests mètodes, anomenats RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), donen lloc a un camp de flux promig i simulat que és més uniforme que el flux real, i, per tant, redueix dràsticament el nombre de punts de malla i la discretització temporal necessària per simular el camp.

Els models bàsics de turbulència que s'utilitzen actualment varien en complexitat des de simples coeficients de viscositat ajustats, fins a sistemes complets d'equacions addicionals. Alguns d'ells són:

- Model de longitud de barreja.
- Model Spalart-Allmaras.
- Model K- Epsilon (amb multitud de variants).

- Models d'esforços tallants de Reynolds.

Tots ells inclouen coeficients que cal ajustar per a cada tipus de flux i que, habitualment, s'obtenen experimentalment. D'altra banda, cada model té les seves preferències i funciona millor en determinades condicions. En definitiva, les simulacions de fluxos turbulents basades en el valor mig posseeixen només l'exactitud dels models que incorporen.

En forma de resum d'aquests comentaris sobre la turbulència, es pot dir que la validesa d'una simulació numèrica depèn en gran part de la modelització de la turbulència, i que, respecte a aquesta, encara no es disposa de models de resolució perfectes.

9.2.3. MÈTODE DELS VOLUMS FINITS

Perquè un ordinador pugui resoldre les equacions que descriuen el moviment del fluid, aquestes han de ser transformades en expressions algebraiques que només continguin números, combinats mitjançant operacions senzilles, tals com sumar, restar i multiplicar.

La transformació de les equacions diferencials en el seu anàleg numèric, és el que es diu procés de discretització numèrica. Hi ha diverses tècniques de discretització, depenent dels principis en què es basin. Les més usades són: diferències finites, volums finits, i elements finits.

Aquí es descriurà breument el mètode dels volums finits, que és el que utilitza el programa STAR CCM+.

Aquest mètode consisteix, fonamentalment, a convertir les equacions diferencials en el seu anàleg numèric, mitjançant una transformació física de les equacions. Per exemple, l'equació de la quantitat de moviment pot ser considerada com una sèrie de fluxos dins d'un volum de fluid, juntament amb un terme font que és el gradient de pressions.

Per mostrar la discretització, es creen volums finits (particions de l'espai) en direcció x, i es fixa l'atenció en el volum enèsim per simplicitat. A la figura següent es pot veure un volum finit típic, o cel·la, on el centre del volum, punt P, és el punt de referència en el qual es vol trobar l'anàleg numèric de l'equació diferencial. Els punts centrals de les cel·les veïnes es denominen "W" i "I" (cel·la oest i cel·la est). Les cares que delimiten la cel·la a un costat i a un altre es denominen "w" i i (cara oest i cara aquest).

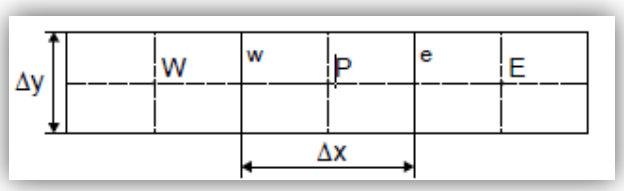


Figura 75. Volum finit. (Elaboració pròpia)

Suposant que es volgués discretitzar la derivada segona següent:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \qquad \text{(Eq. 64)}$$

S'ha de fer a partir de les derivades primeres a les cares que delimiten la cel·la

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_P = \frac{\left(\frac{\partial U}{\partial x_e} - \frac{\partial U}{\partial x_w}\right)}{x_e - x_w} \qquad \text{(Eq. 65)}$$

Aquestes derivades es calculen a partir dels valors de la variable "U" al centre de les cel·les veïnes:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_e = \frac{U_E - U_P}{x_E - x_P} \qquad \text{(Eq. 66)}$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_w = \frac{U_P - U_W}{x_P - x_W} \qquad \text{(Eq. 67)}$$

Aquestes expressions són utilitzades per implementar les derivades de les equacions en una cel·la qualsevol. D'aquesta manera, es pot trobar l'anàleg numèric de les equacions diferencials per a cada volum finit, i després resoldre el sistema d'equacions algebraiques resultant. De la mateixa manera, poden introduir-se les condicions de contorn, afegint termes font a les equacions de les cel·les corresponents.

9.2.4. DEPENDÈNCIA DEL TEMPS I NO LINEALITAT

Els mètodes que s'han comentat resolen sistemes d'equacions lineals, amb coeficients constants, i no es poden usar directament per resoldre les equacions del flux, ja que no són lineals (en elles hi ha productes de variables). A més, la

velocitat i la pressió del fluid poden dependre del temps, per la qual cosa cal resoldre tot el sistema per a cada instant de temps. Per tant, caldrà discretitzar el temps, com ja s'ha fet amb la resta de variables, i resoldre el sistema per a cada pas temporal.

Perquè sigui possible emprar els mètodes de resolució de sistemes que s'han comentat, es linealitzen les equacions. Els termes no lineals, com hem vist, són els productes de les velocitats per les seves derivades. Per això es discretitza la derivada, i s'utilitza el valor de la velocitat existent a la cel·la que es tracti:

$$u\frac{\partial u}{\partial x} \quad es\ converteix\ en:\ \bar{u}\frac{u_{i+1,j}-u_{i-1,j}}{2\delta x} \qquad \text{(Eq. 68)}$$

Així es pot resoldre el sistema lineal d'equacions de forma iterativa. Una vegada resolt, el valor de la velocitat a la cel·la i,j haurà canviat, es torna a linealitzar el sistema amb els nous valors de les velocitats, i es repeteix el procés fins que s'arribi a una solució.

Posteriorment, caldrà incrementar el pas temporal, i resoldre el sistema per al nou instant de temps. En el cas que sigui un problema estacionari, aquest últim procés de canviar el pas temporal, s'omet.

9.2.5. CONDICIONS DE CONTORN

La solució d'un problema depèn de les condicions inicials i de les condicions de contorn a les quals està sotmès el fluid. Les condicions de contorn més habituals que solen aparèixer en els problemes resolts amb CFD són les següents:

- Pressió en un determinat contorn. Es pot fixar pressió estàtica o pressió total.
- Velocitat en el contorn. Es pot fixar direcció i mòdul, o només direcció, combinada amb la condició de pressió. En ocasions s'especifica el cabal de fluid en comptes de la velocitat.
- Si intervé l'equació de l'energia també cal concretar condicions de contorn per a la temperatura: valor fix, flux de calor…

Imposant aquestes condicions, es pot simular el comportament dels contorns reals d'un fluid, tals com les parets, entrades en canonades, sortides a l'exterior, etc.

Les parets sòlides són condicions de contorn especialment crítiques. Això és a causa del comportament del fluid en les proximitats de la mateixa. En les superfícies sòlides es genera una capa límit de fluid en la qual la velocitat varia

ràpidament a mesura que ens apropem a la paret. La simulació directa de la capa límit és extremadament difícil i requereix uns recursos desproporcionats, per la qual cosa se solen utilitzar models específics.

9.3. METODOLOGIA

Als paquets de software CFD existents, l'usuari ha d'especificar les condicions del problema que es vol resoldre, així com facilitar a l'ordinador certs paràmetres de resolució perquè el programa aconsegueixi trobar una correcta solució del problema. Els passos genèrics que cal seguir són:

- Especificació de la geometria del problema. Cal introduir al programa els contorns del domini del problema. Aquest procés és relativament simple quan el model és bidimensional. Quan el model és tridimensional, l'especificació de la geometria pot ser realment complexa.
- Creació del mallat, o cel·les a les quals seran calculades totes les variables. El mallat pot ser estructurat o no estructurat. El mallat estructurat està format per rectangles o paral·lelepípedes ordenats, que poden deformar-se per adaptar-se a les superfícies corbes de la geometria. El mallat no estructurat està habitualment format per triangles o tetraedres i, en qualsevol cas, no té un ordre matricial. Aquest últim tipus de mallat és molt més senzill d'ajustar a formes complexes que l'anterior, encara que és més costós de calcular.
- Definició dels models que s' utilitzaran. Bàsicament de turbulència, però per a certes simulacions poden fer mancada models de radiació, flux bifàsic, etc. Aquests models han d'estar implementats al programa.
- Especificació de les propietats del fluid, tals com la viscositat, la densitat, les propietats tèrmiques, etc. Si escau el programa ha de ser capaç de manipular les equacions de variació d'aquestes propietats amb la temperatura, la pressió, etc.
- Imposició de les condicions de contorn, que controlen els valors de certes variables als límits del domini. Bàsicament s'imposen valors fixos de la pressió, velocitat i temperatura, o dels seus gradients. També cal imposar condicions per a les variables de turbulència que hi hagi, segons el model que s'estigui utilitzant.
- Introducció de les condicions inicials. En el cas d'un problema no estacionari, fa falta definir uns valors de les variables per a tots els punts del domini, des dels quals començarà el programa a calcular les solucions dels successius passos temporals. En el cas d'un problema estacionari, cal introduir al programa uns valors inicials de les variables, dels quals partirà el procés iteratiu.

- Control dels paràmetres que afecten a la resolució numèrica del problema. Es pot actuar sobre el procés iteratiu definint els tipus de discretització, variant els factors de relaxació, i fixant els criteris de finalització de les iteracions.
- Procés de càlcul. Durant el mateix, és habitual monitoritzar la convergència i controlar l'evolució de les variables en alguns punts.
- Anàlisi de la solució. Comprovació que la resolució és correcta i estudi dels resultats. La gran quantitat de dades que es genera fa necessari l'ús de sistemes gràfics de post processat.

9.4. SIMULACIÓ CFD

Amb el disseny del vehicle definit, es procedeix a realitzar la simulació CFD per conèixer el valor del coeficient de resistència aerodinàmica. En el cas que aquest valor no sigui l'adequat, la simulació permetrà identificar les zones del vehicle a les quals caldrà millorar el disseny. Aquest procés iteratiu ha de permetre assolir el valor de Cx desitjat.

La simulació pretén simular el moviment del vehicle durant el seu funcionament normal. La velocitat del vehicle serà de 14m/s (50km/h) ja que aquesta és la velocitat mitjana dels desplaçaments que es realitzen en una ciutat. De totes maneres aquest aspecte no té rellevància, ja que el valor del coeficient de resistència aerodinàmica és independent de la velocitat del vehicle.

9.4.1. SOFTWARE CFD STAR CCM+

El software que s'utilitzarà per realitzar la simulació CFD és el STAR CCM+. Aquest programa inclou totes les possibilitats de simulació típiques dels software CFD. Disposa d'una amplia gamma de models físics, que proporcionen a l'usuari un conjunt d'eines que permeten abordar els problemes d'enginyeria més complexes.

Un dels aspectes diferencials d' aquest programa respecte als altres, és la tecnologia de mallat de poliedres o hexaedres que utilitza, ja que les malles s'ajusten estrictament a la geometria de forma automàtica, garantint així la optimització de la malla i una major precisió que els programes on el mallat s'ha de realitzar manualment.

9.4.2. ETAPES DE LA SIMULACIÓ CFD

A continuació s'explicaran les característiques principals de la simulació CFD i es definiran els paràmetres escollits per configurar la simulació. A l'annex 3, s'explica, pas a pas i de forma més detallada, tot el procés de configuració de la

simulació CFD del vehicle dissenyat amb el software STAR CCM+, des de la importació del model fins a la obtenció dels resultats i post processat d'aquests.

9.4.2.1. Generació del model o geometria

STAR CCM+ disposa d'un motor de CAD que ofereix la possibilitat de generar la geometria del model. També permet importar models en diferents formats de CAD. En aquest cas, s'ha optat per importar, en format IGS, el model 3D del vehicle que ja s'ha confeccionat prèviament amb CATIA V5.

El model importat, no només consta del vehicle, sinó que també incorpora una caixa exterior que envolta el cotxe i que simula l'espai que ocuparà l'aire. Aquesta caixa és necessària per poder definir posteriorment, les condicions de contorn de la simulació CFD.

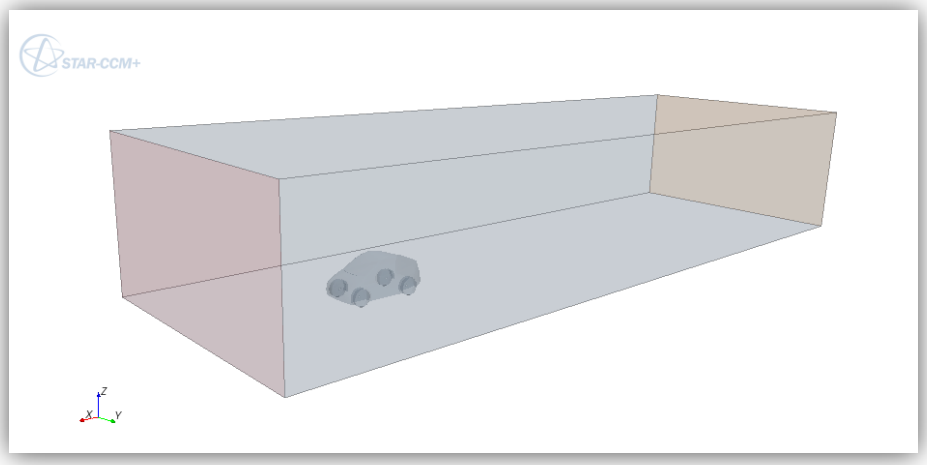


Figura 76. Model del conjunt importat en format IGS. (Elaboració pròpia)

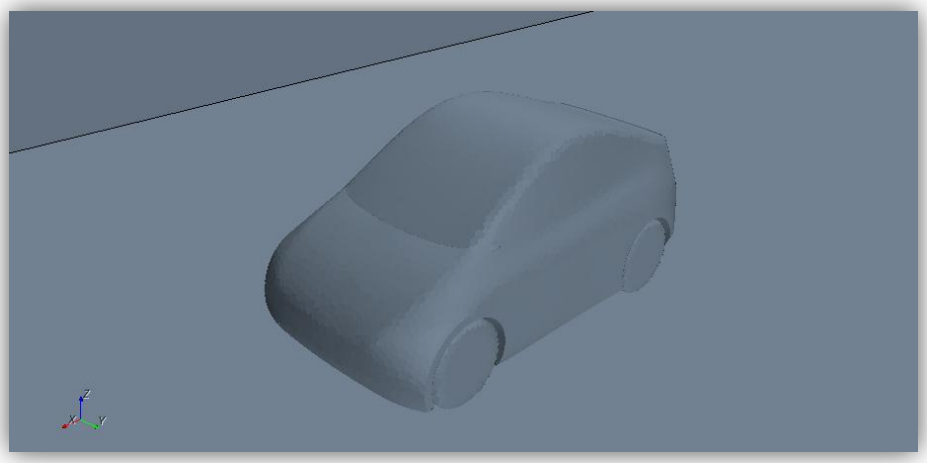


Figura 77. Model del vehicle importat en format IGS. (Elaboració pròpia)

Per poder simular el model, aquest ha de complir dos requisits imprescindibles:

- El model ha de disposar d'un únic volum per el qual fluirà l'aire.
- Les superfícies d'aquest volum han d'estar perfectament tancades.

Una vegada s'ha completat la importació del model amb èxit, STAR CCM+ permet fer un anàlisi del volum per comprovar que les superfícies estan correctament connectades de manera que no hi hagi cap obertura que alhora de realitzar la simulació conduiria a la inestabilitat del model i per tant a error.

Una vegada es comprova que el model és vàlid, ja es pot procedir a la configuració del mallat.

9.4.2.2. Mallat del domini

El procés de mallat consisteix, bàsicament en convertir lo infinit en finit. Existeixen infinits punts a l'espai i per tant, és absolutament impossible calcular les velocitats en tots aquests punts. De manera que el que es fa és discretitzar l'espai de tal forma que una vegada mallat, ja es disposarà d'un número finit de punts on calcular les variables desitjades.

Com ja s'ha comentat, el programa STAR CCM+ té l'avantatge que és capaç de generar la malla automàticament en funció dels paràmetres de configuració escollits. D'aquesta manera permet obtenir una malla optimitzada i perfectament adherida a la superfície.

Les comandes de configuració de la malla que s'han utilitzat en aquesta simulació són:

- Mallar tot el volum d'aire.
- La malla estarà formada per elements polièdrics.

L'avantatge de la malla polièdrica respecte a la tetraèdrica, és que per a una malla amb el mateix nombre d'elements, la polièdrica ofereix major precisió.

Elements de la malla tindran una grandària estàndard de 0,5m. A les zones del vehicle i del terra, on es requereix més precisió de càlcul, els elements de la malla tindran una grandària entre el 10% i el 15% respecte a les dimensions estàndard. Això permetrà disposar de més elements en aquestes zones i per tant es podrà obtenir una millor informació. Una vegada s'han definit les característiques d ela malla, aquesta ja es pot generar de forma automàtica.

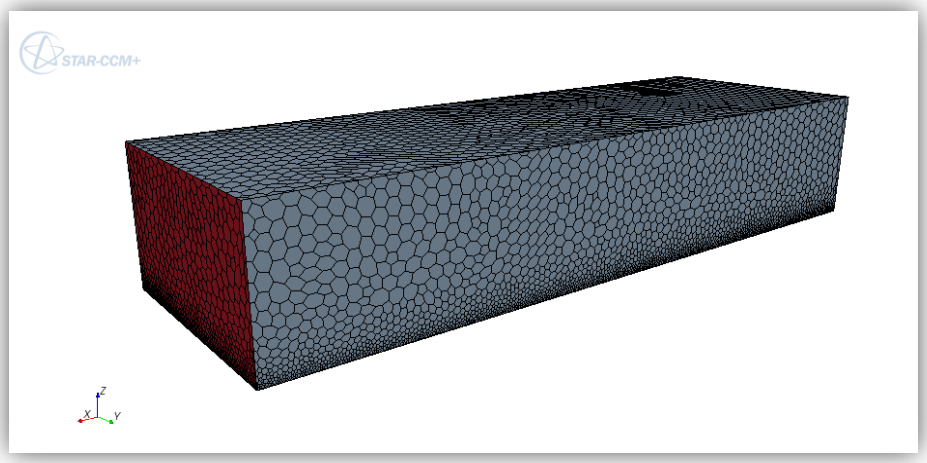


Figura 78. Aspecte de la malla exterior. (Elaboració pròpia)

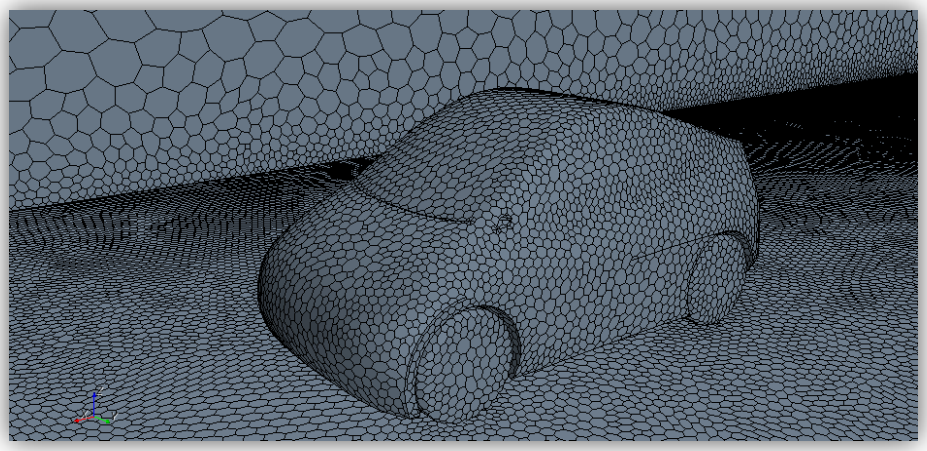


Figura 79. Aspecte de la malla al voltant del vehicle. (Elaboració pròpia)

La figura anterior mostra la diferència de grandàries entre els elements de la malla de les parets de la caixa, i els elements del terra i el vehicle, als quals se'ls hi ha aplicat una malla més prima.

9.4.2.3. Definició dels models físics

Els models físics escollits per aquesta simulació estan basats en models estàndard de simulació de vehicles, de manera que no s'ha realitzat cap tipus de comparativa entre models, per determinar les característiques de cadascun i escollir el més adient. De manera que els models que s'utilitzaran en aquesta simulació són els següents:

Espai de treball:

TRIDIMENSIONAL: Activa la opció de model en 3 dimensions.

Temps:

ESTACIONARI: Indica que les variables no tenen cap dependència respecte al temps.

Tipus de fluid:

GAS: El fluid de treball es considerarà del tipus gas. Aquesta opció permet simular un gas pur i el programa, per defecte, agafa les propietats de l'aire, les quals poden ser modificades.

Tipus de flux:

FLUX SEGREGAT: Aquest model resol les equacions de flux (un per a cada component de la velocitat, i un per a la pressió) en una segregació, o no enganxats. El vincle entre les equacions de moviment i la continuïtat s'aconsegueix amb un enfocament predictor-corrector.

Equació d'estat:

DENSITAT CONSTANT: És la hipòtesi de flux incompressible, en que la densitat és invariable respecte al temps durant tot el procés.

Règim de viscositat:

TURBULENT: Representa un flux que està en un estat d'inestabilitat permanent, mostrant irregularitats de petita escala i d'alta freqüència en fluctuació en l'espai i el temps.

Model de turbulència:

K-EPSILON: Ofereix un bon compromís entre la robustesa, el cost computacional i la precisió. És el model més simple ja que només requereix la definició de les condicions inicials o de contorn. És el model més validat.

Com ja s'ha comentat anteriorment, a l'annex 3 es pot trobar l'explicació de tots els passos que s'han seguit per configurar la simulació.

9.4.2.4. Condicions de contorn

Per adequar el problema a la situació que es pretén simular, cal definir les condicions inicials de la simulació així com les condicions de contorn, que són essencials per poder resoldre les equacions.

En el cas que ens ocupa, es simularà la condició en que el vehicle es troba aturat i és l'aire el que avança cap al cotxe. Per activar aquesta opció, des del punt de vista relatiu tant el terra com el sostre i les parets laterals també avancen, igual que l'aire, cap al cotxe, per tant aquestes parets s'han de configurar com a parets mòbils.

Les condicions de contorn que s'aplicaran són:

- La paret frontal de la caixa es considerarà una "entrada de velocitat", i és per on el fluid entrarà dins el volum de simulació. Aquest fluid (aire) entrarà en direcció perpendicular a la paret i a una velocitat de 14m/s (50km/h).
- La paret posterior de la caixa es considerarà com una "sortida de pressió", amb un valor de la pressió estàtica relativa igual a zero. Aquest límit serà per on el fluid abandonarà el volum d'aire.
- Les parets del vehicle tindran la condició de "paret" i per tant la velocitat a tota la seva superfície serà zero, de manera que el flux no la travessa.
- Les parets laterals, el sostre i el terra també tindran la consideració de paret però s'activarà la opció que permet que es desplacin a la mateixa velocitat que el flux d'aire.

9.4.2.5. Inicialització de la solució

Per començar el procés de càlcul iteratiu, a partir del qual el programa va generant les solucions de les equacions, el programa necessita uns valors inicials de les variables. Les condicions inicials en aquest cas, seran únicament que el flux d'aire a l'entrada tingui una velocitat inicial igual a la velocitat a la que es vol fer la simulació i que serà de 14m/s. Això farà que s'arribi més ràpidament a la situació d'equilibri i evitarà "malgastar" iteracions fins que s'assoleixen els 14m/s a l'entrada, que és el que passaria si el valor inicial de velocitat és de zero.

9.4.2.6. Paràmetres de càlcul i resolució

Els factors de relaxació controlen directament el procés iteratiu. D'una forma simplificada pot veure's el procés de càlcul com la resolució d'un sistema d'equacions amb tantes variables com elements de malla. Aquests sistemes no

admeten un mètode de resolució directe, i s'utilitza un procediment iteratiu, és a dir es parteix d'uns valors arbitraris de les variables, s'aplica el sistema i s'obté un resultat una mica millor, s'aplica el sistema a aquests nous valors i s'obté un resultat una mica millor que l'anterior, etc. El procés continua fins que la diferència entre el resultat utilitzat i obtingut és suficientment petit i s'accepta la solució com a correcta.

A la pràctica el procés és més complex, entre altres coses perquè el sistema d'equacions discretitzat no és lineal. Per poder resoldre'l es linealitza, però perquè la solució final sigui correcta, durant el procés iteratiu és necessari anar ajustant el sistema. Aquest ajust fa que, si en el procés iteratiu s'utilitzen directament els resultats de la iteració anterior, els nous resultats, en comptes d'estar més a prop de la solució, estan més lluny de manera que el càlcul divergeix. Per corregir aquesta tendència, en comptes d'utilitzar directament els resultats trobats, es fa una mitjana amb aquests i els anteriors. Com més pes tinguin els resultats anteriors, més estable serà el procés, encara que també faran falta més iteracions per arribar a la solució definitiva. Els factors de relaxació (under-relaxation factors) indiquen el pes de la nova solució per a cada variable. Com més petits, més estable. Els valors per defecte són adequats per a la majoria dels casos quan s'utilitza una discretització de primer ordre. Si en algun cas no es té una convergència satisfactòria, una de les primeres opcions és utilitzar valors de relaxació més petits.

Per al cas que s'està resolent s'utilitzarà tant la discretització com els valors de relaxació per defecte.

La finalització de les iteracions la determinen dos criteris definits durant la configuració d'aquesta. En primer lloc, que la simulació arribi al nombre d'iteracions màximes definit per l'usuari. La segona opció és que els residus prenguin un valor suficientment baix, com per considerar que la solució ha convergit. Els residus de cada variable són la diferència entre el valor de la solució nova i l'anterior i el criteri de convergència que s'acostuma a considerar és que els residus es trobin per sota de 0,001. Tot i que aquest valor es considerarà suficient per al cas d'estudi, és un valor una mica escàs per a la majoria de les simulacions, i per obtenir bones solucions cal baixar-lo a 0.0001 o 0.00001. Quan s'utilitza precisió simple és difícil obtenir convergències millors que aquestes, doncs s'entra a la zona dels errors d'arrodoniment als càlculs.

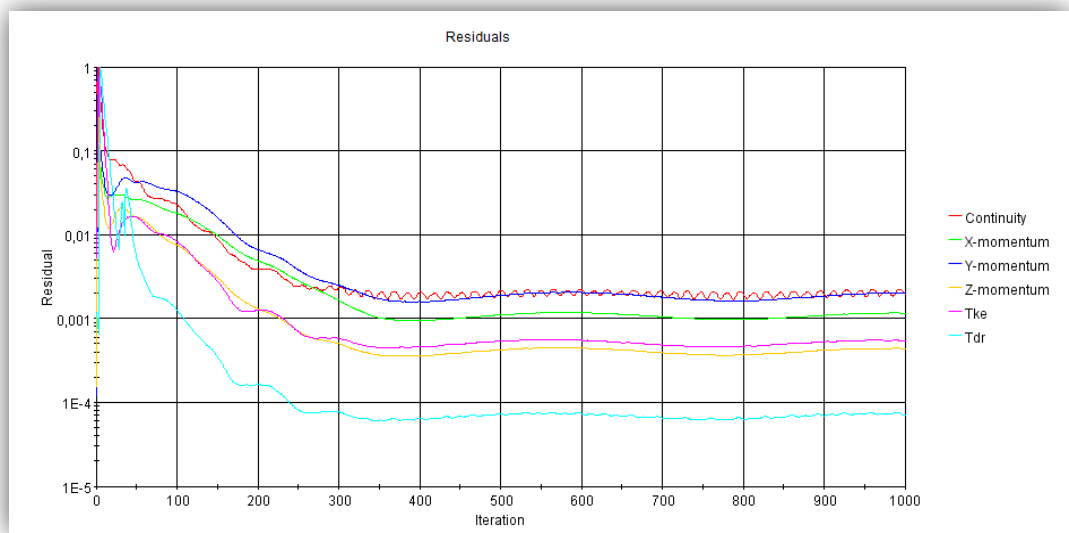


Figura 80. Gràfica dels residus de la simulació. (Elaboració pròpia)

9.4.2.7. Resultats de la simulació

Amb la simulació finalitzada, el següent pas és analitzar els resultats obtinguts. La gran quantitat d'informació que es genera en una simulació CFD fa que sigui molt adient representar la majoria d'aquests resultats en forma de gràfiques que permeten analitzar-los millor. Un dels primers paràmetres que cal observar, és l'evolució dels residus per veure que aquests han convergit correctament. En aquest cas, els residus mostrats a la Figura 80, tot i que els seus valors no es troben tots per sota dels tres ordres de magnitud, si que es pot veure com la solució s'ha estabilitzat. De manera que si s'augmentés el nombre d'iteracions, la solució pràcticament no canviaria.

Les variables que s'han avaluat durant la simulació són les següents:

Distribució de pressions:

Les següents imatges mostren la distribució final de la pressió dinàmica al voltant del vehicle.

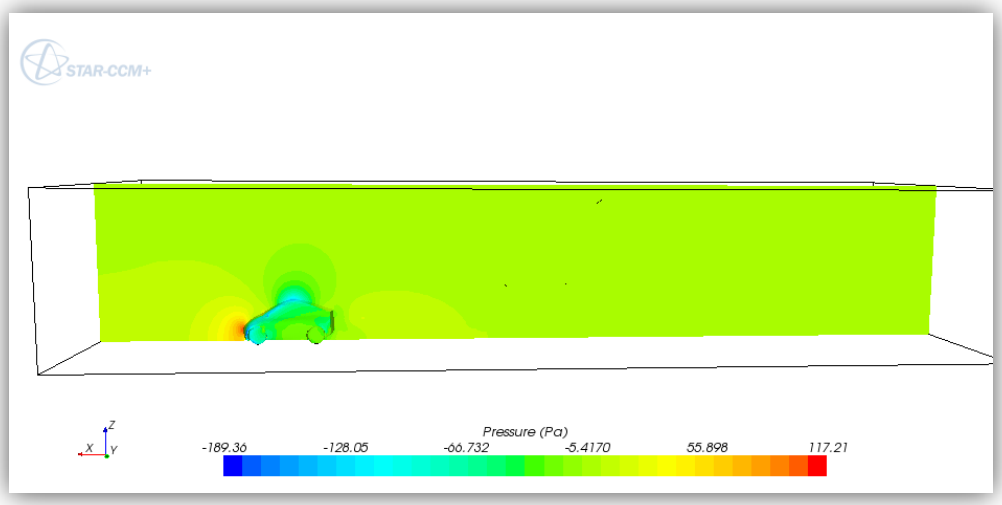


Figura 81. Distribució de pressions (I). (Elaboració pròpia)

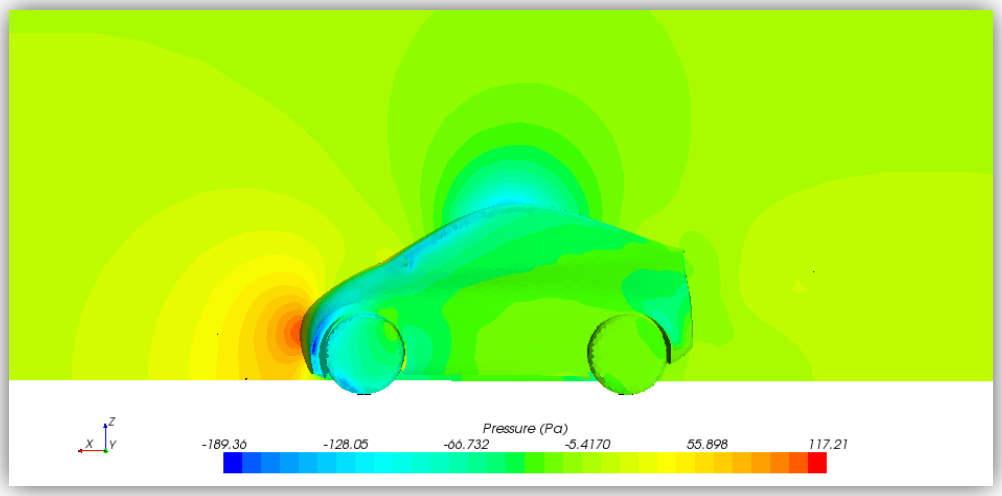


Figura 82. Distribució de pressions (II). (Elaboració pròpia)

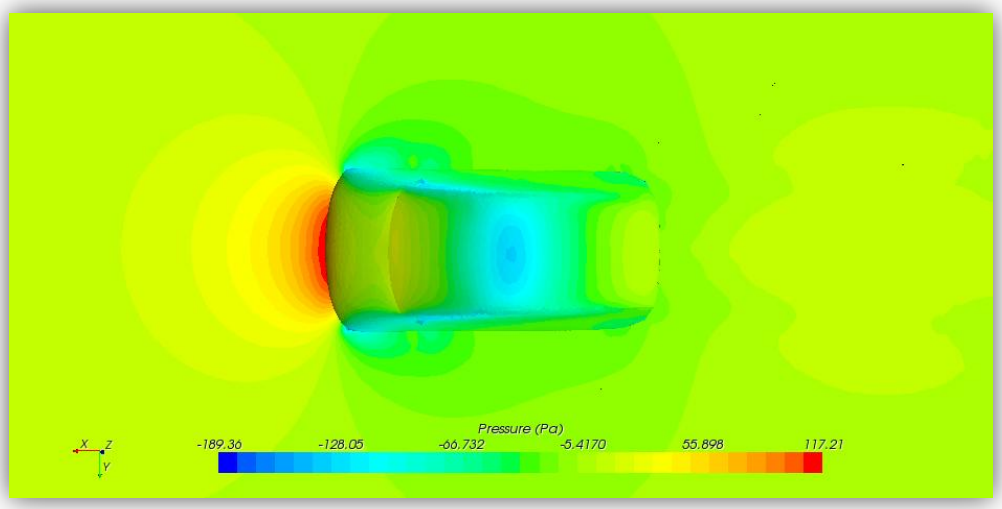


Figura 83. Distribució de pressions (III). (Elaboració pròpia)

La distribució de pressions permet visualitzar la zona d'estancament que es produeix a la part frontal del cotxe, en la qual el valor de la pressió és màxima. També es pot apreciar com a la part superior del sostre del vehicle, es crea una depressió deguda a l'augment de la velocitat del flux en aquest punt. Aquest fenomen també es produeix als extrems de la part frontal.

Distribució de velocitats:

Les següents imatges mostren la distribució final de velocitats al voltant del vehicle.

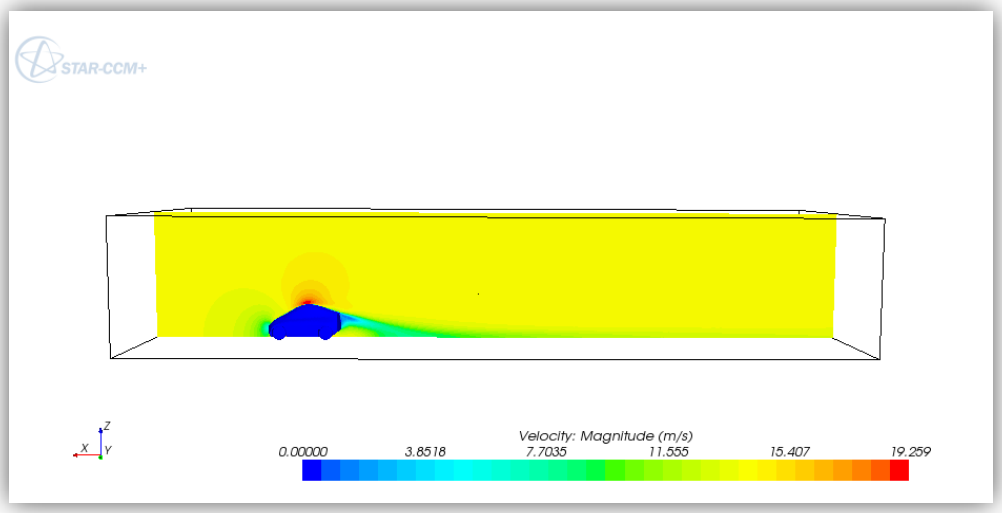


Figura 84. Distribució de velocitats (I). (Elaboració pròpia)

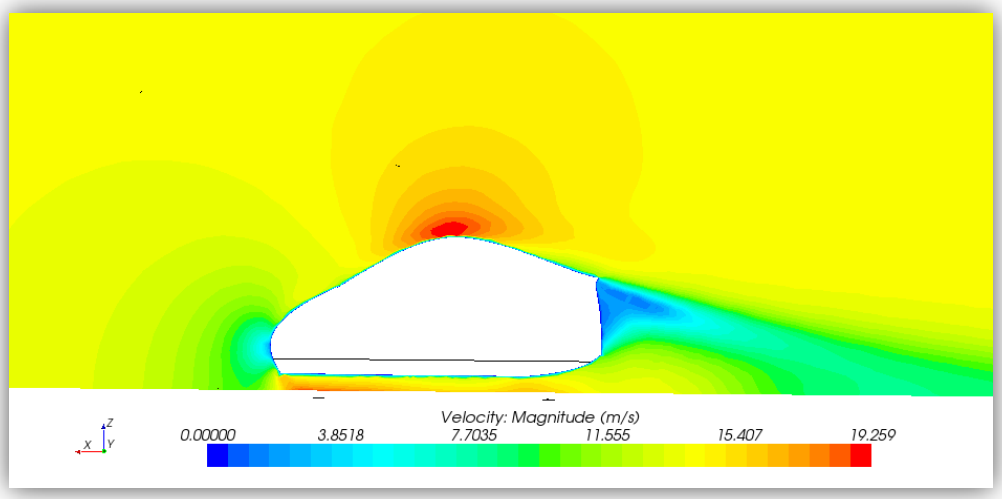


Figura 85. Distribució de velocitats (II). (Elaboració pròpia)

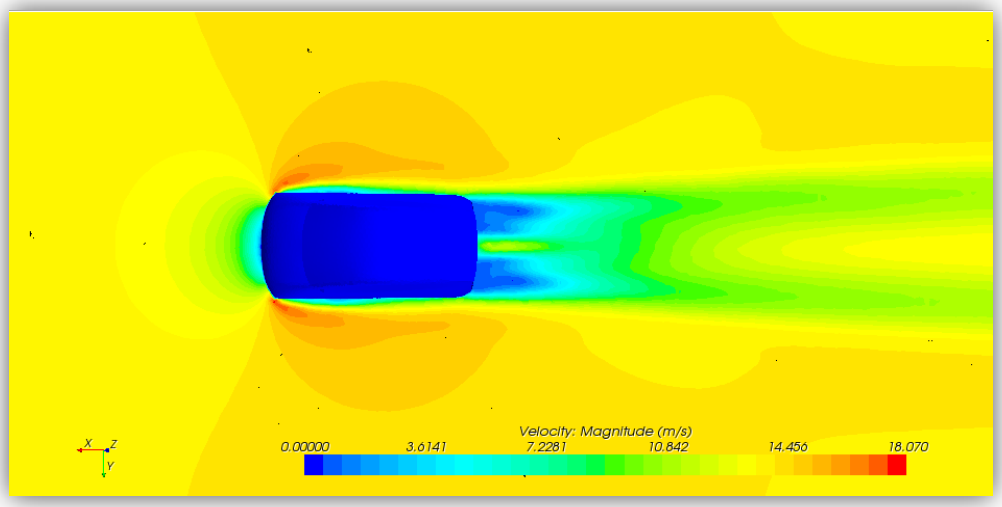


Figura 86. Distribució de velocitats (III). (Elaboració pròpia)

Per la conservació de l'energia, el comportament de la velocitat és recíproc a la pressió. La zona d'estancament frontal, on la pressió és màxima, es deu a que la velocitat en aquest punt és mínima. Contràriament que a la zona del sostre on la depressió generada és deguda a l'augment de la velocitat del flux induït per la curvatura.

Coeficient de resistència aerodinàmica (C_X):

La següent gràfica mostra l'evolució del coeficient de resistència aerodinàmica al llarg de la simulació. Es pot veure com al inici presenta una certa inestabilitat i a

mesura que la velocitat al voltant del vehicle es va estabilitzant, aquest també ho fa.

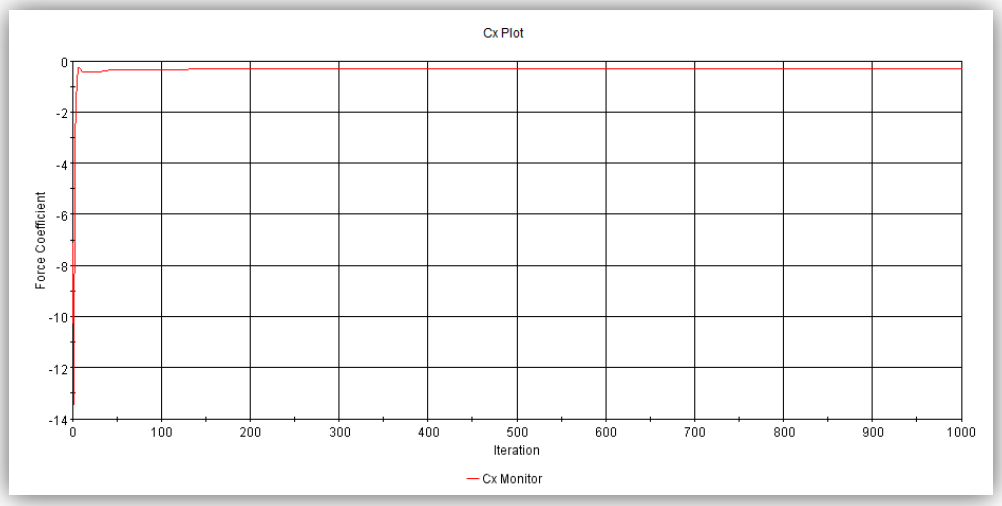


Figura 87. Gràfica del Cx. (Elaboració pròpia)

El valor final del coeficient de resistència, tal i com es mostra a la següent captura del programa, és de 0,328.

Part	Pressure()	Shear()	Net()
CAR	-3,080387e-01	-2,051792e-02	-3,285566e-01
Total:	-3,080387e-01	-2,051792e-02	-3,285566e-01

Monitor value: 0.328556627

Figura 88. Valor finals del coeficient de resistència aerodinàmica (Cx). (Elaboració pròpia)

10. DISSENY ADOPTAT

Un cop s'han explicat els passos que s'han anat seguint tant per realitzar el disseny del vehicle amb CATIA V5, com per configurar i desenvolupat la simulació CFD amb STAR CCM+, en aquest apartat es vol comentar quins aspectes s'han tingut en compte alhora de decidir el disseny del cotxe i intentar justificar la seva forma exterior.

Per aconseguir reduir el coeficient aerodinàmic del vehicle, s'ha de dur a terme un disseny amb la intenció d'aconseguir que:

- El flux d'aire segueixi longitudinalment tot el contorn del vehicle, intentant que aquest es mantingui el més enganxat possible al cotxe.
- Reduir l'estela que el fluid produeix en el moment en que es desenganxa del vehicle a la part posterior.

El que s'ha intentat fer és observar aquells vehicles que presenten coeficients de resistència aerodinàmica més baixos. La Figura 63 mostra alguns exemples. Una vegada analitzats, s'han enumerat alguns aspectes que tenen en comú i que per tant, que semblen contribuir a una millora del Cx. Aquestes característiques observades són les següents:

- Formes suaus i arrodonides a la part frontal.
- Poca inclinació del parabrises respecte al capó.
- Formes laterals suaus i sense presencia d'irregularitats.
- Alçada del sostre relativament baixa per reduir l'àrea frontal.
- La unió del sostre i la part posterior mitjançant una suau inclinació, característica en els vehicles del tipus liftback [23].

Figura 89. Exemple de vehicle tipus liftback.

[23] *Liftback - tipus de carrosseria utilitzada en alguns automòbils de turisme, en la qual la tapa del maleter inclou el vidre posterior, el qual està molt inclinat respecte a la vertical.*

Des del punt de vista dels dissenyadors i experts en aerodinàmica, l'objectiu de tot disseny és aconseguir reduir al màxim la fricció que l'aire exerceix sobre el cotxe. Per aconseguir això, es dedica especial atenció a la forma en que l'aire s'adhereix a la superfície del vehicle i com aquest es desprèn a la part posterior. Els experts coincideixen en afirmar que és a la part posterior on s'aconsegueix, en gran mesura, que un cotxe sigui bo aerodinàmicament, ja que és molt important aconseguir minimitzar l'efecte de les turbulències que es generen pel despreniment del fluid.

Segons les fonts citades a la bibliografia, per aconseguir millorar el coeficient de resistència aerodinàmic, el vehicle en qüestió hauria d'adoptar les següents característiques:

- Reduir l'alçada del vehicle, ja que comportarà una reducció de l'àrea frontal.
- Reduir l'alçada del punt d'estancament o punt en el qual la velocitat de l'aire és nul·la, a la zona davantera del vehicle i evitar així que el flux d'aire es dirigeixi cap als baixos del cotxe. A la següent figura, la forma de color blau seria la més adequada per reduir la resistència.

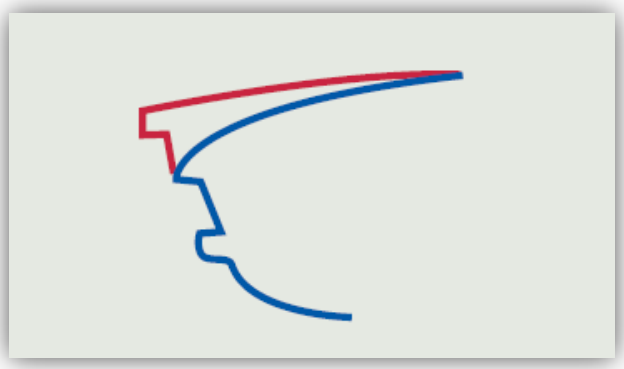


Figura 90. Exemple de possibles dissenys de la part frontal. (Font:)

- Suavitzar les línies des del punt d'estancament frontal cap al capó.
- Augmentar la inclinació del capó fins a aconseguir l'adhesió del flux d'aire sobre ell.
- Augmentar la inclinació del parabrisa respecte a la vertical, fins a un valor proper a 60º, ja que a partir d'aquest valor comencen a aparèixer problemes de visibilitat, escalfament excessiu de l'habitacle,etc.
- Un disseny lleugerament corbat als laterals cap a la zona posterior, de manera que el cotxe sigui més estret a la part del darrera.

- Delimitar la zona lateral respecte a la part posterior per mitjà d'un angle més o menys punxegut, per crear turbulència i que aquesta es dirigeixi cap a la zona central de la part posterior i evitar el despreniment del fluid en cas que aquesta delimitació sigui amb una forma arrodonida.
- Reduir i arrodonir al màxim els elements exteriors com retrovisors o manetes de les portes.
- La part de sota del vehicle ha de ser el més continua i suau possible, aixecant-se a la part posterior per afavorir la sortida del flux d'aire.
- La unió entre el sostre i la part posterior on aniria el maleter, ha de tenir una inclinació que no estigui compresa entre els 25º i els 40º respecte la horitzontal.

Alhora de confeccionar el disseny final del vehicle, s'han tingut molt en compte aquestes indicacions i s'han intentat implementar en la mesura del possible. Totes les modificacions s'han introduït, sobretot amb la intenció de que el flux d'aire segueixi el contorn del vehicle sense desenganxar-se i que a la zona posterior, on aquest es desenganxa del cotxe, minimitzar al màxim l'estela generada. Seguidament es mostren els detalls del vehicle:

Finalment, les dimensions del vehicle són les següents:

- Longitud total: 3135mm.
- Amplada total: 1543mm.
- Alçada total: 1467mm.

L' alçada final s'ha reduït fins als 1467mm, que és un valor pràcticament idèntic en models com el Toyota Aygo o el Citröen C1.

El punt d'estancament frontal es troba relativament baix, a 400mm del terra. S'ha intentat que la progressió des d'aquest punt cap al capó sigui el més suau possible.

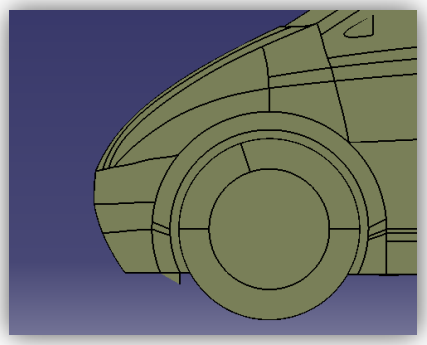


Figura 91. Punt d'estancament frontal i línia de traça del capó.

La inclinació del parabrises respecte a la vertical és exactament de 60º tal i com es mostra a la següent figura.

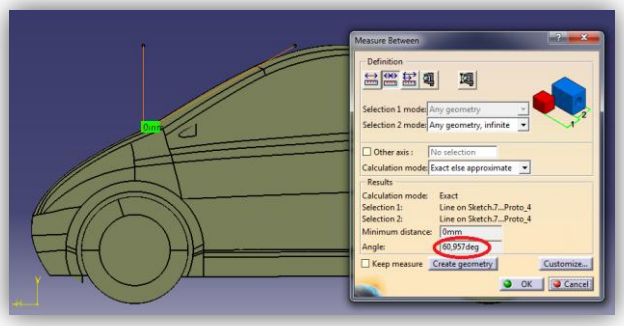


Figura 92. Inclinació del parabrises respecte la vertical.

La lleugera curvatura dels laterals afavoreix la adhesió del flux al contorn del vehicle en la circulació cap a la part posterior. Juntament amb una petita reducció de l'amplada del vehicle a la part final ajuda a reduir l'estela del fluid en el moment en que es desprèn de la superfície del cotxe.

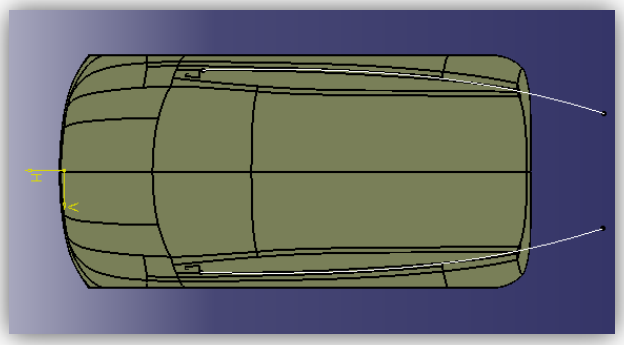


Figura 93. Curvatura lateral i reducció de l'amplada final de la part posterior.

Per delimitar les superfícies laterals de la part posterior, s'han evitat les formes arrodonides i s'ha optat per un acabat en angle. Aquesta solució fa que quan l'aire arriba al final de la superfície lateral, es torni turbulent i sigui absorbit per la depressió que es crea a la cua del vehicle, evitant el seu despreniment i per tant contribuint a reduir-ne l'estela i la conseqüent resistència.

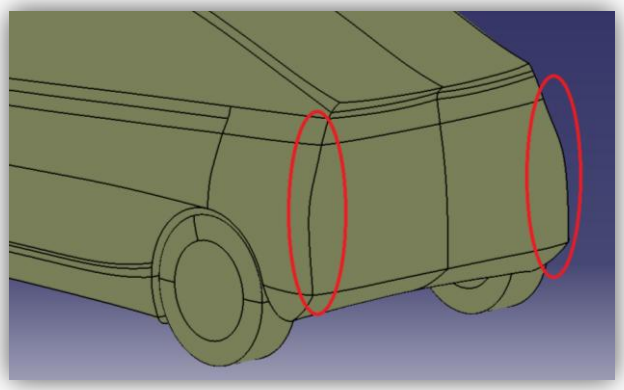


Figura 94. Delimitació de les superfícies laterals i posterior.

Amb l'objectiu de reduir al màxim els elements exterior tals com retrovisor, manetes de les portes, etc, els retrovisors seran reemplaçats per càmeres, les quals necessiten un espai molt més reduït per a la seva instal·lació i amés ofereixen un camp de visió molt més ampli.

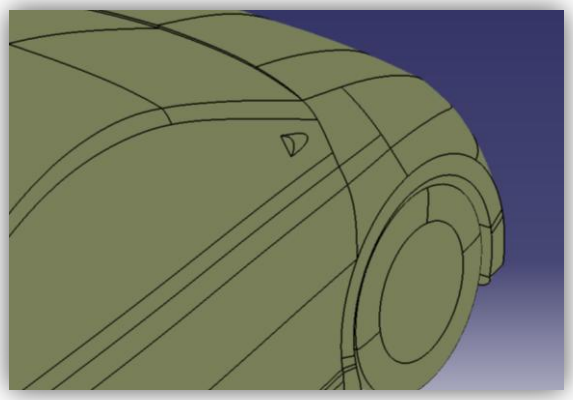


Figura 95. Càmeres instal·lades en substitució dels retrovisors convencionals.

La superfície dels baixos del cotxe, segueix una forma llisa i regular amb una inclinació a la part final per afavorir la sortida del flux d'aire que circula per sota el vehicle amb l'objectiu clar de reduir l'estela generada.

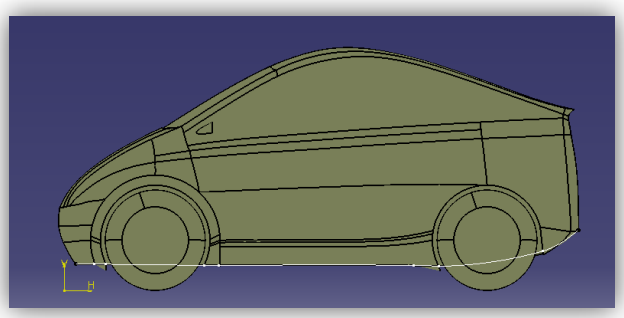


Figura 96. Trajectòria dels baixos del vehicle.

L'últim aspecte important del disseny, és la forma del sostre i la inclinació que té des de la part més elevada fins a la part posterior.

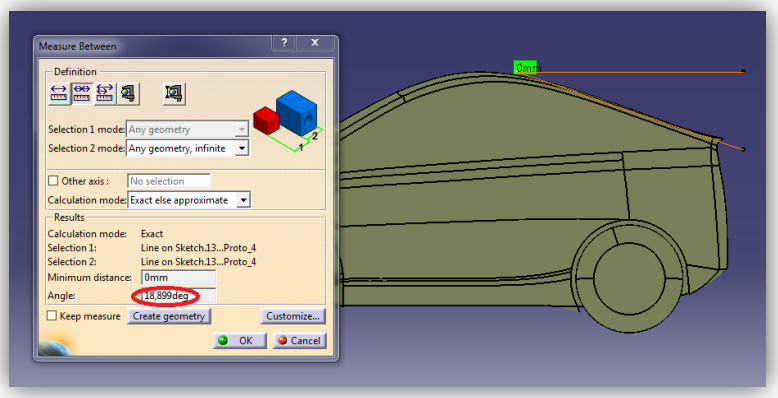


Figura 97. Inclinació de la part posterior del sostre.

En primer lloc, la forma del sostre, amb aquest arrodoniment que presenta a la part més elevada, pretén afavorir l'adherència del flux d'aire a la superfície del cotxe per mitjà de l'efecte Coanda.

L'efecte Coanda és un fenomen físic, que es produeix en mecànica de fluids, en el qual un corrent de fluid (gasosa o líquida) tendeix a ser atret per una superfície tangent a la seva trajectòria com a conseqüència de l'efecte de la viscositat. La següent imatge mostra un exemple on es veu que el flux d'aire segueix la superfície corba, degut a la viscositat d'aquest.

Figura 98. Exemple de l'efecte Coanda. (Font:)

Al primer cas podem apreciar que l'efecte no s'aprecia, ja que la superfície no té curvatura, sinó un canvi brusc de forma que talla la força relacionada amb la viscositat. Al segon cas l'adherència sobre la superfície del cos es manté degut a la curvatura, de manera que l'aire tendeix a seguir la forma per l'efecte d'aquesta força relacionada amb la viscositat.

Tornant a la imatge del vehicle doncs, aquesta forma permet que el flux s'adhereixi a la superfície del cotxe evitant el seu despreniment, la qual cosa comportaria un augment de l'estela, provocat per la generació de turbulències, i incrementaria la resistència aerodinàmica.

Precisament per evitar el despreniment del flux d'aire que segueix la trajectòria del sostre, s'ha incorporat una mena d'aleró posterior que té una funció similar a l'angle de delimitació entre les superfícies laterals i la part posterior. És a dir, aquest aleró fa que quan l'aire arribi al seu extrem, sigui absorbit per la depressió que es crea a la part posterior del vehicle, evitant el seu despreniment i contribuint a reduir l'estela generada.

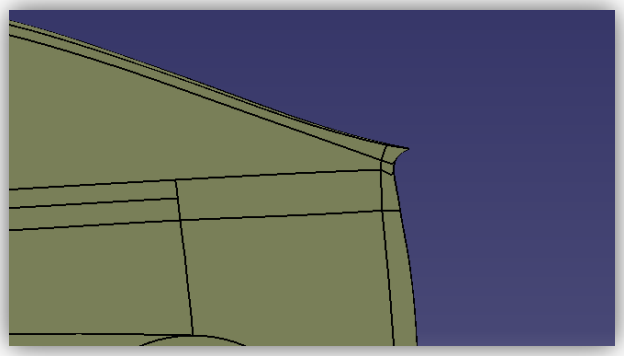


Figura 99. Petit aleró posterior.

10.1. EVOLUCIÓ DEL DISSENY

Durant l'etapa de disseny del vehicle, s'han realitzat diferents models abans no s'ha aconseguit el disseny final. A continuació es mostra una taula amb els

diferents models que s'ha implementat i els valors de coeficient de resistència aerodinàmic obtinguts:

NOM DEL MODEL	Cx	AREA FRONTAL [m^2]
PROTO_1	0,5122	1,96
PROTO_2	0,4469	2,11
PROTO_3	0,4238	1,75
PROTO_4	0,3585	1,85
PROTO_4B	0,3419	1,86
PROTO_4C	0,3276	1,86
PROTO_4D	0,3285	1,87

Taula 14. Taula resum dels diferents dissenys desenvolupats. (Elaboració pròpia)

Com es pot veure, s'han realitzat fins a un total de 4 dissenys diferents, mentre que la última versió (Proto_4) ha estat millorada en 4 ocasions fins aconseguir el resultat desitjat amb el disseny del Proto_4D. La única diferència que presenta el model definitiu respecte al Proto_4C, és que aquest últim incorpora l'allotjament de les càmeres retrovisores.

El disseny del Proto_1, respon únicament a un primer disseny que ha servit per comprovar l'habilitat en el maneig de les eines de CAD. EL resultat del Cx obtingut indica que no es tracta del disseny adequat.

El Proto_2 intenta recrear la idea de vehicle amb formes més arrodonides per afavorir la circulació del flux, però el seu disseny és encara molt simple i el resultat confirma que no es tracta de la solució que es busca.

El Proto_3 intenta recrear un estil de traces més suau que els dissenys anteriors, sobretot a les zones de canvis d'inclinació entre superfícies. Tot i una lleugera millora en el valor del Cx, aquest encara es troba lluny de l'objectiu establert.

Per últim, el Proto_4 representa un canvi respecte als seus antecessors, sobretot en la concepció de la part posterior del vehicle. Les formes arrodonides donen pas a línies més uniformes però amb delimitacions en angle entre les superfícies laterals i la superfície posterior. Aquesta modificació, atesos els resultats obtinguts ha resultat ser un encert. Les versions B, C i finalment la D simplement presenten canvis en la inclinació d'algunes zones i major arrodoniment en altres.

A continuació es mostren els diferents dissenys.

PROTO_1

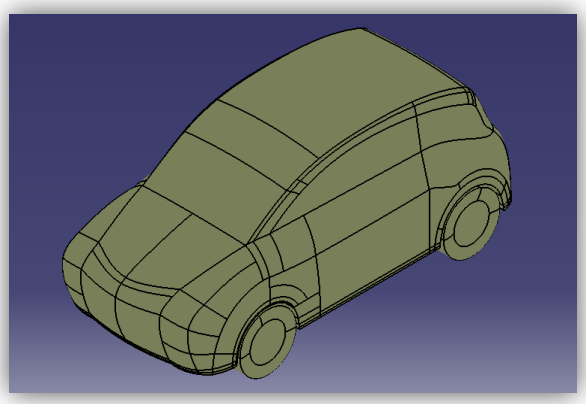


Figura 100. PROTO_1.

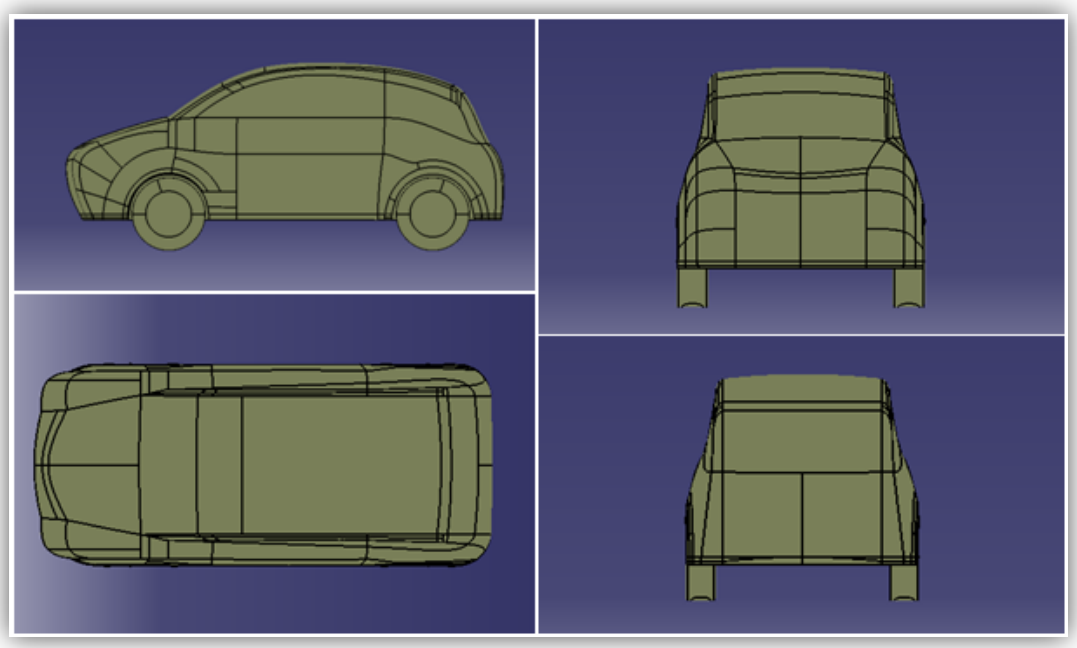


Figura 101. PROTO_1. Vistes.

PROTO_2

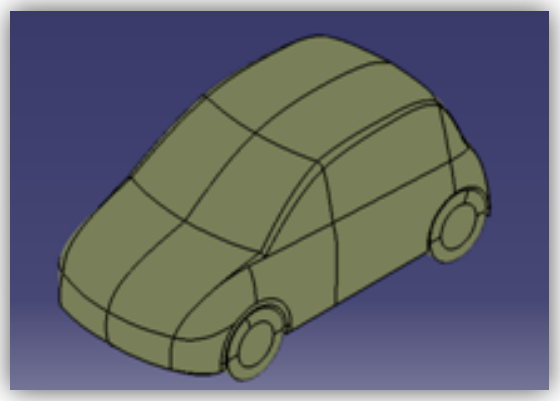


Figura 102. PROTO_2.

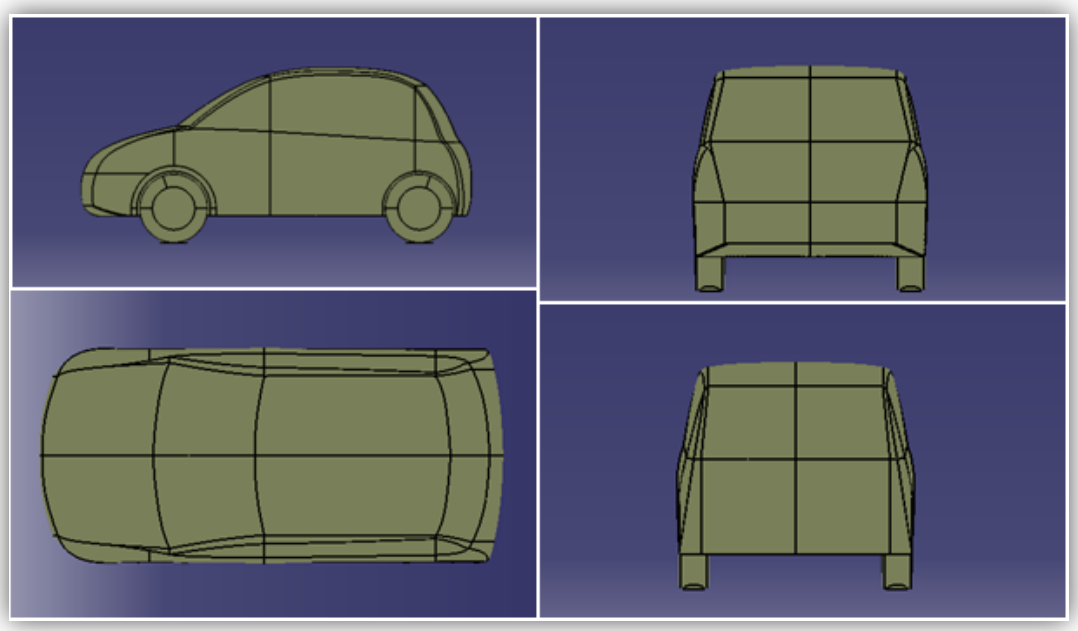


Figura 103. PROTO_2. Vistes.

PROTO_3

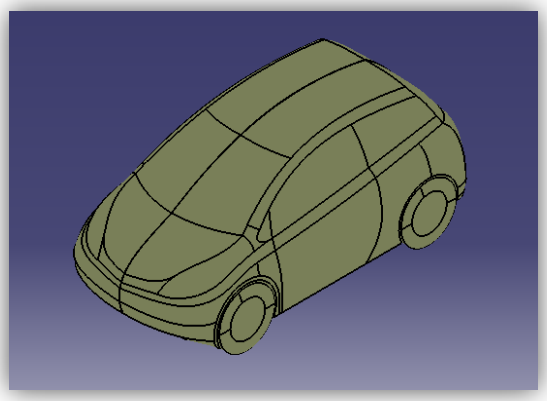


Figura 104. PROTO_3.

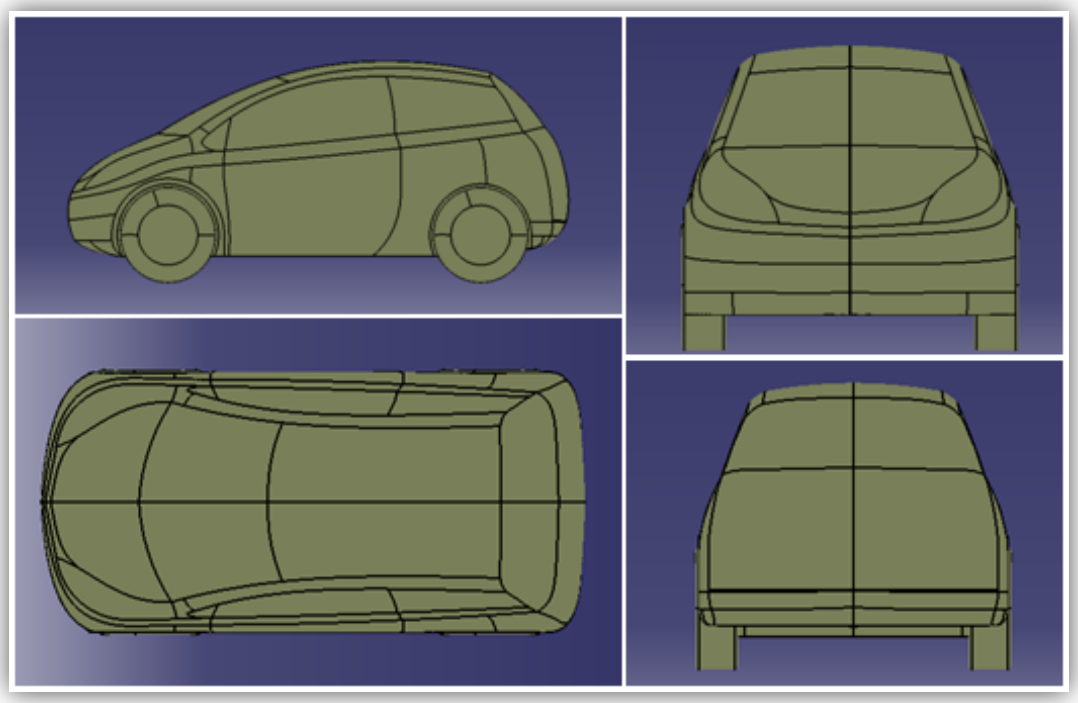


Figura 105 PROTO_3. Vistes.

PROTO_4

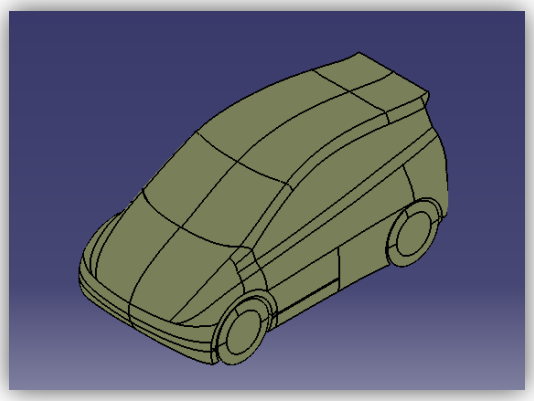


Figura 106. PROTO_4.

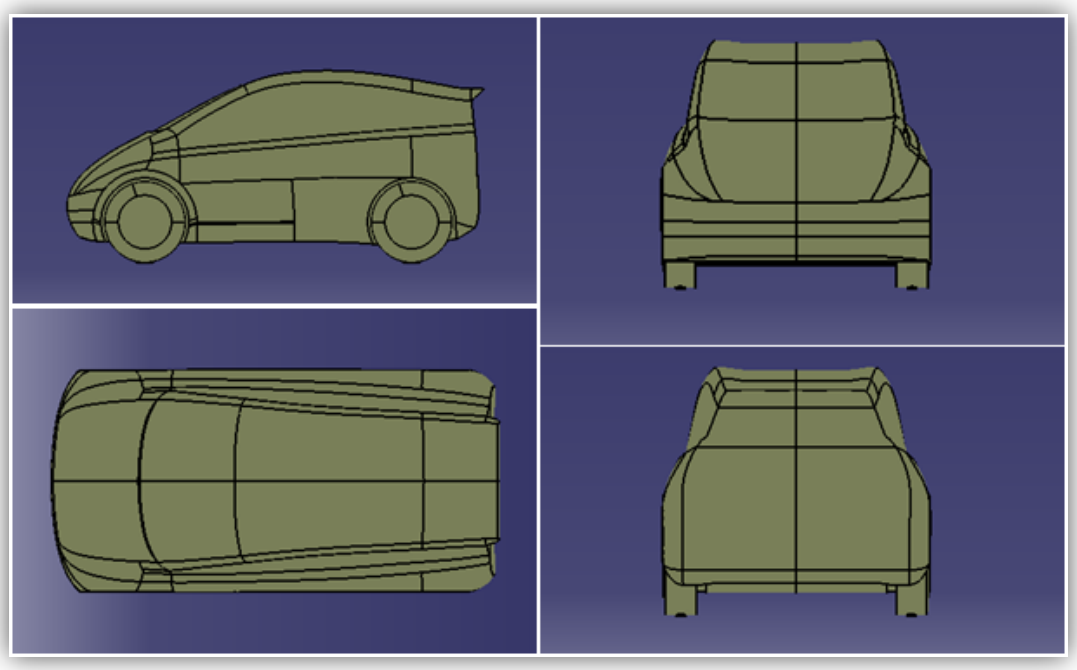


Figura 107. PROTO_4. Vistes.

PROTO_4B

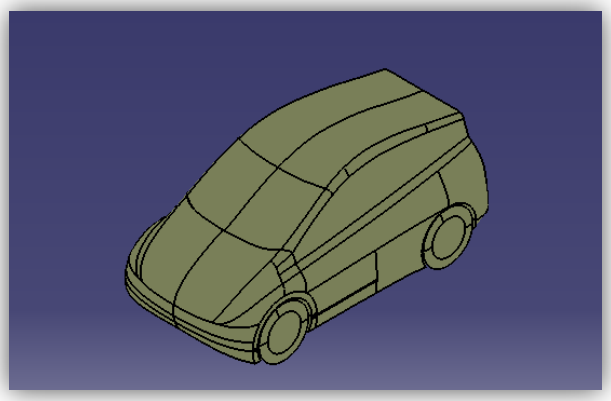


Figura 108. PROTO_4B.

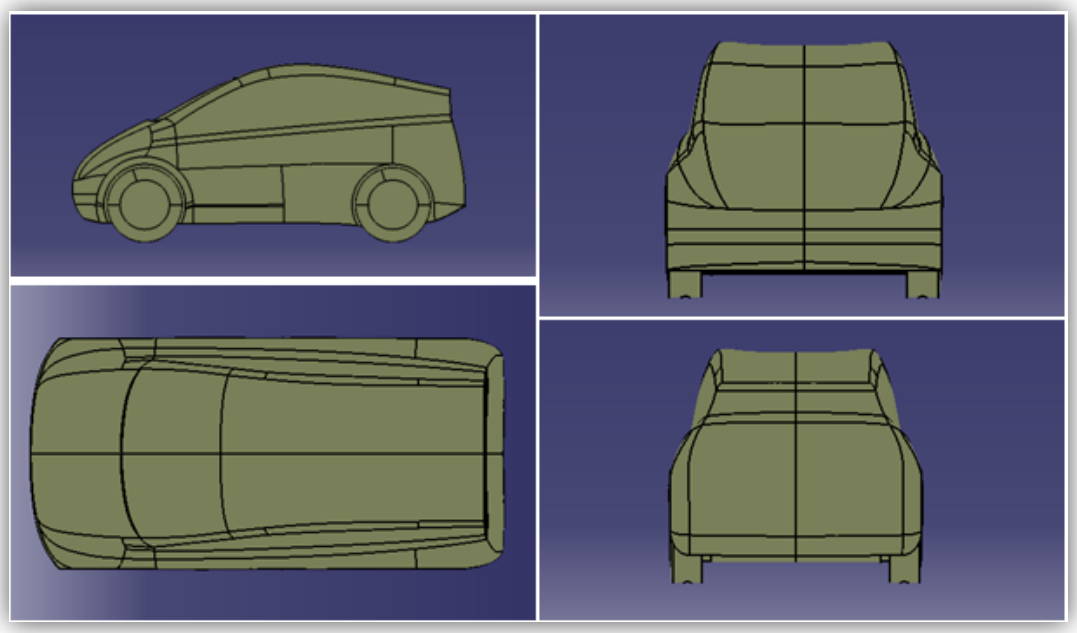


Figura 109. PROTO_4B. Vistes.

PROTO_4C

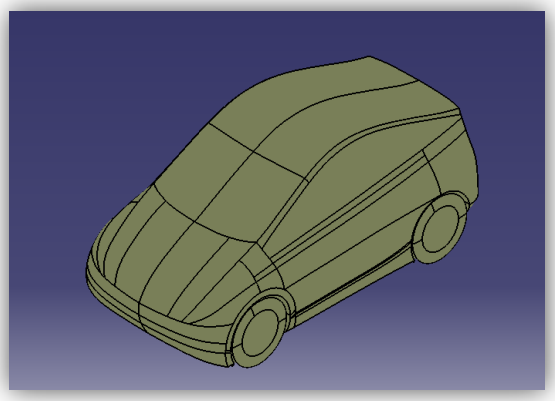


Figura 110. PROTO_4C.

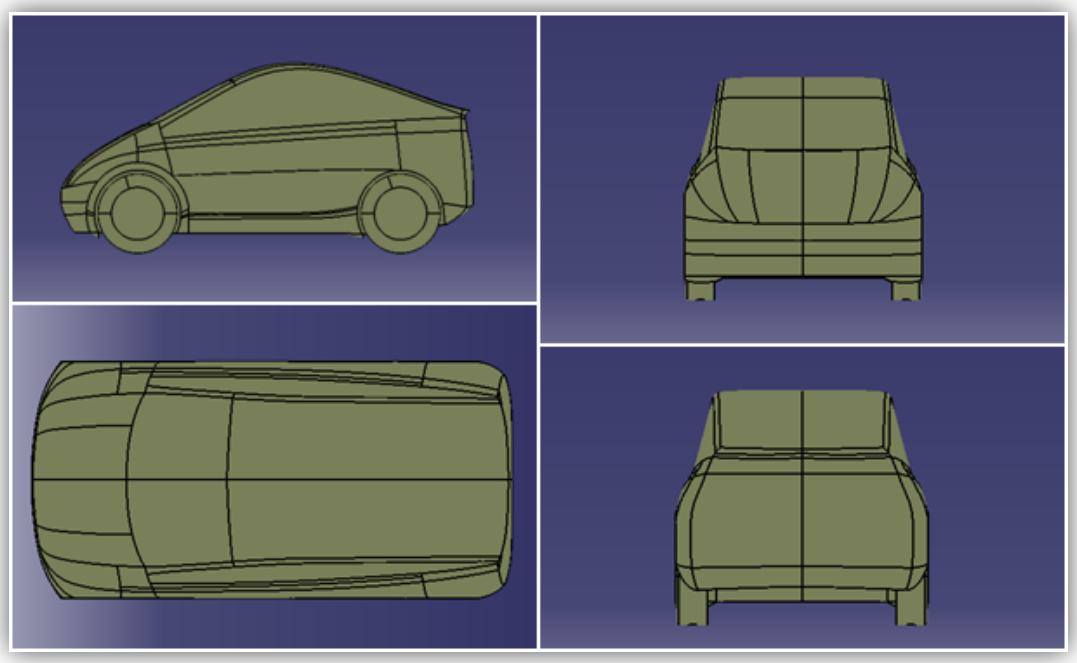


Figura 111. PROTO_4C. Vistes.

PROTO_4D

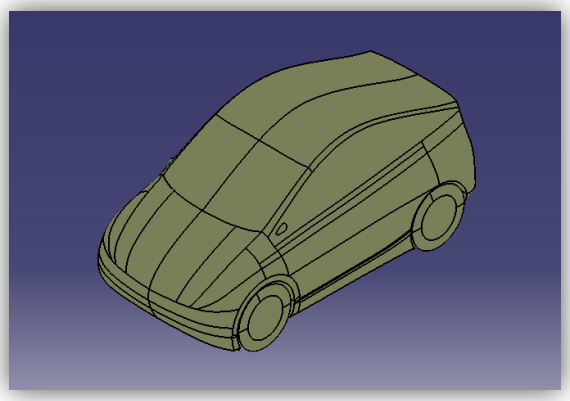


Figura 112. PROTO_4D.

10.2. RESULTAT FINAL

El valor final del coeficient de resistència aerodinàmica de 0,328, resulta ser un valor força acceptable que es troba dins de l'objectiu marcat al inici del procés de disseny, que s'establia en aconseguir un Cx inferior a 0,35. Si a aquest valor s'afegeix que l'àrea frontal del vehicle és d'uns escassos 1,86m^2 s'obté una superfície d'arrossegament de 0,610m^2, que comporta una reducció de la resistència aerodinàmica i per tant del consum energètic del vehicle.

A continuació, per veure l'efecte del Cx en l'autonomia del vehicle, s'ha realitzat la simulació, per a diferents valors del coeficient de resistència aerodinàmica, i els resultats obtinguts es mostren a continuació:

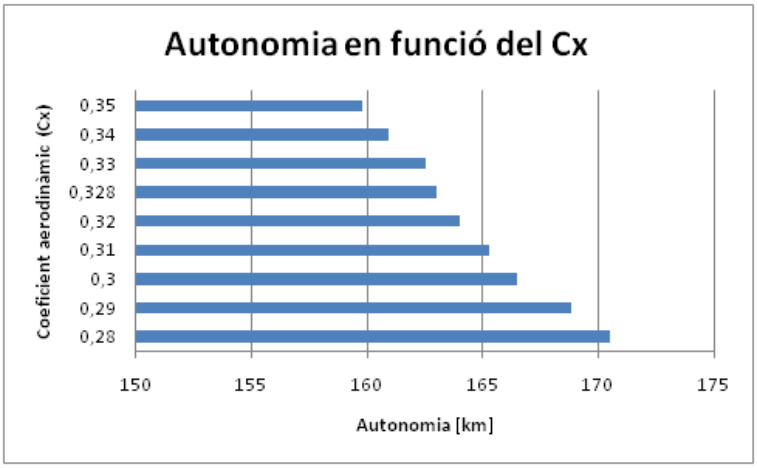


Figura 113. Comparativa d'autonomia en funció del Cx. (Elaboració pròpia)

Veient els resultats, es pot comprovar que la variació del Cx per si sol, té una afectació relativament baixa en l'autonomia final, ja que passar d'un Cx de 0,35 a un Cx de 0,28 es tradueix en un augment de l'autonomia de només 10km, que representa un 6,5% de guany. En canvi en quant a disseny, obtenir aquesta disminució del Cx té molta dificultat. El que es vol dir amb això, és que per millorar l'autonomia en aquest vehicle concret, intentar reduir el Cx potser no seria la millor solució, ja que s'aconseguiria poca millora degut a que l'àrea frontal ja és molt reduïda, i ja fa que la resistència aerodinàmica es minimitzi.

Això no vol dir que el Cx no afecti a l'autonomia, perquè si es simulés el seu efecte en vehicles amb una major area frontal, els resultats que s'obtindrien serien més aclaridors, i permetrien veure millor les diferencies.

11. SISTEMES DE RECÀRREGA RENOVABLE EN FUNCIONAMENT

Com s'ha comentat amb anterioritat, un dels objectius d'aquest projecte és avaluar la possibilitat de dotar el vehicle d'algun sistema que permeti produir energia durant el funcionament del cotxe, per subministrar-la al motor o recarregar les bateries, i que aquesta energia provingui d'una font renovable.

La idea principal és que aquesta solució aporti una extensió del rang d'autonomia del vehicle, ja sigui de forma directe, és a dir aportant energia directament per a la tracció, o de forma indirecte que seria aportant energia per alimentar els sistemes auxiliars del vehicle evitant que tot el consum d'aquests sistemes sigui absorbit per la bateria secundaria i posteriorment per la bateria principal quan la secundària s'hagi esgotat.

Les opcions que es tindran en compte per a aquests sistemes de recàrrega seran l'energia solar i l'energia eòlica. L'energia solar pel fet que un vehicle circula per espais exterior i està contínuament exposat a la llum del sol. L'energia eòlica perquè, durant el funcionament del vehicle, aquest es troba en tot moment envoltat d'aire, que a mesura que augmenta la velocitat de desplaçament, també augmenta la força que l'aire oposa a l'avanç del vehicle. De manera que es pot idear un sistema de captació que permeti recollir l'energia solar i l'energia eòlica amb l'objectiu d'aprofitar-la.

11.1. SISTEMA DE CAPTACIÓ EÒLICA

11.1.1. L'ENERGIA EÒLICA

L'energia eòlica, és l'energia que s'obté del vent, és a dir, l'energia cinètica deguda als moviments de les masses d'aire com a conseqüència dels diferencials de pressió que hi ha a l'atmosfera. Aquesta energia és transformada, mitjançant aerogeneradors o turbines elèctriques, per obtenir energia elèctrica.

L'energia eòlica és un recurs abundant, renovable, net i que ajuda a disminuir les emissions de gasos d'efecte hivernacle, ja que és una alternativa a les centrals elèctriques existents, les quals si que generen emissions.

11.1.1.1. Energia aprofitable del vent

El vent, com tota massa en moviment, té una energia cinètica per unitat de temps que arriba a les pales de l'aerogenerador i respon a l'expressió següent:

$$\frac{dEc}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm}{dt} \cdot v^2 \qquad \text{(Eq. 69)}$$

On *v* és la velocitat del vent i el cabal màssic d'aire és equivalent a:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{d\forall}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot A \cdot v \qquad \text{(Eq. 70)}$$

On ρ és la densitat de l'aire i A és la superfície escombrada per les pales de l'aerogenerador. De manera que l'energia cinètica per unitat de temps resultant és:

$$\frac{dEc}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \qquad \text{(Eq. 71)}$$

La potència elèctrica que es pot extraure és:

$$P_{ELECTRICA} = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3\right) \cdot C_P \cdot \eta_{GE} \cdot \eta_T \qquad \text{(Eq. 72)}$$

On C_P és el coeficient de potència de l'aerogenerador, η_T és el rendiment de la transmissió que incorpora l'aerogenerador i que actua de multiplicador per adoptar la velocitat de gir de les pales a la velocitat de gir idònia del generador elèctric per maximitzar-ne el seu rendiment. η_{GE} és el rendiment del generador .

11.1.1.2. Llei de Betz

El coeficient de potència (C_P) d'un aerogenerador, equival a l'eficiència d'aquest, és a dir la potència que podem extreure del vent (P) respecte la potència total del vent (P_0).

$$C_P = P/P_0 \qquad \text{(Eq. 73)}$$

En aquest aspecte hi ha un limitació física, definida per la llei de Betz, que diu que la potència màxima que es pot extraure del vent és l'equivalent al 59,3% (16/27) de la seva potència intrínseca. Això és degut a que si intentem extreure tota l'energia del vent, l'aire sortiria amb una velocitat nul·la, és a dir, l'aire no podria abandonar la turbina o aerogenerador. En aquest cas no s'extrauria cap

energia en absolut, ja que òbviament també s'impediria l'entrada d'aire al rotor de l'aerogenerador.

11.1.2. CONCEPTES DE VEHICLE EÒLIC

El sistema que es pretén introduir al vehicle elèctric, seria un sistema en el qual les turbines eòliques anessin incorporades a la carrosseria del vehicle, de manera que la seva utilització no comprometés la seguretat dels ciutadans del voltant, per tant es descarten solucions similars a les mostrades a la figura següent, on s'incorpora un aerogenerador de grans dimensions per transformar l'energia eòlica en electricitat per a les bateries.

Figura 114. Vehicle participant en una competició de vehicles eòlics al 2008.

Tot i que aquesta solució és la que permetria incorporar un aerogenerador de grans dimensions, la qual cosa significaria una major energia elèctrica generada, no sembla una solució apte per ser incorporada en vehicles d'ús quotidià, ja que podria comportar problemes de seguretat als ciutadans, per la presència d'un element mòbil a l'abast de la gent, i amés no s'ajustaria amb la idea de desenvolupar un vehicle d'aspecte similar als actuals.

El conceptes de sistema eòlic de les figures següents, s'acosten més al sistema que es vol adoptar en aquest projecte. A la següent figura, es mostra un vehicle que funciona a partir d'energia eòlica i energia solar. En aquest cas incorpora un grup de turbines (tres a la part frontal i una a la part posterior), que van integrades a la carrosseria del cotxe.

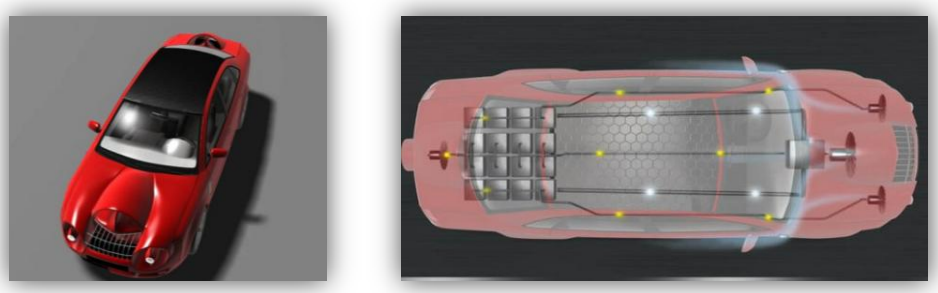


Figura 115. AirRay Car de la companyia americana Earth Sure.

Aquesta solució, és bona per a vehicles de certes dimensions, ja que amés de l'espai que ocupen les turbines, també és necessari disposar d'espai suficient per allotjar el sistema de transmissió, en cas que fos necessari, i els generadors que converteixen l'energia eòlica en electricitat.

La següent proposta, és un concepte bastant més futurista que sembla poc concebible en l'actualitat i que es tracta d'incorporar un aerogenerador a cada roda i un cinquè aerogenerador, situat a la base del cotxe, que absorbiria l'aire que circula per sota el vehicle per produir electricitat.

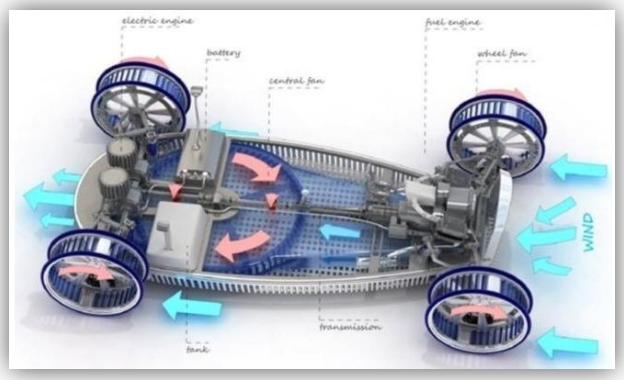


Figura 116. Ventile, un vehicle híbrid amb sistema d'absorció d'aire.

11.1.3. CARACTERISTIQUES DEL SISTEMA PROPOSAT

El sistema que es vol proposar en aquest projecte, estaria format per un aerogenerador d'eix horitzontal, amb una superfície el més gran possible en funció de les dimensions del vehicle i situat a la part frontal del vehicle (ubicació similar a la que tenen els radiadors als vehicles convencionals), o per dos aerogeneradors de la mateixa tipologia, però de menor superfície. Al estar situat a la part frontal, l'aerogenerador captaria aire amb un nivell menor de

turbulències que no pas si estigues localitzat a la part del darrera, de manera que l'eficiència serà millor. La següent figura mostra un croquis del sistema.

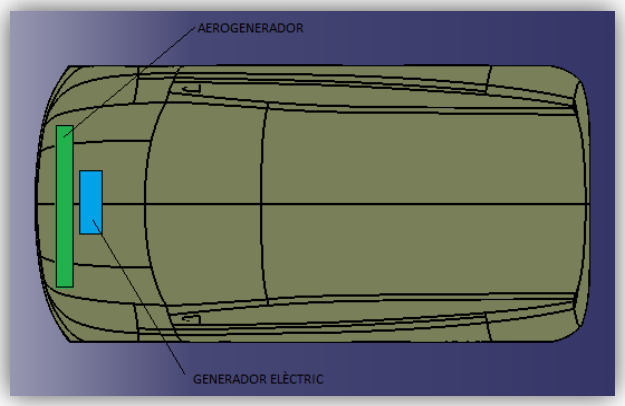


Figura 117. Imatge del vehicle amb el volum que representa l'aerogenerador i el volum que representa el generador elèctric.

Un aspecte molt important per a l'obtenció d'energia eòlica, és la velocitat del vent que ha d'absorbir l'aerogenerador, ja que aquest paràmetre té una gran importància en el resultat final. En el cas de tractar-se d'un aerogenerador estacionari situat en una determinada ubicació de la geografia, seria imprescindible conèixer la distribució de la velocitat del vent en aquella ubicació durant les diferents èpoques de l'any, per poder realitzar una previsió de l'energia disponible. En canvi, en el cas que ens ocupa l'aerogenerador anirà instal·lat en un vehicle que es desplaçarà per espais urbans, on la velocitat del vent a l'alçada del terra es podria considerar quasi nul·la, de manera que la velocitat d'entrada de l'aire al aerogenerador serà pràcticament igual a la velocitat de desplaçament del vehicle en cada instant. Per tant, a major velocitat major serà l'energia produïda.

Per comprovar l'energia que el sistema podria aportar al conjunt, es realitza un càlcul aproximat tenint en compte les dimensions del vehicle i per tant la superfície disponible a partir de la qual obtenir la previsió d'energia. Els paràmetres a definir són:

- El valor de la densitat (ρ) a 25ºC de temperatura és de 1,18kg/m^3.
- Superfície (A) màxima que poden tenir els aerogeneradors, tenint en compte les dimensions del vehicle, és de 0,25m^2 (radi ≈ 0,3m).
- Els rendiments del generador elèctric (η_{GE}) i de la transmissió (η_T) es suposen de 0,90.

- El factor de potència (C_P) tenint en compte que es tracta d'un aerogenerador de dimensions molt petites, amb un radi inferior a 0,3m, i que les condicions de funcionament estaran lluny de les òptimes (degut a que la direcció del vent respecte el vehicle difícilment serà la ideal) es suposa, en el millor dels casos, proper a 0,15.

Un cop definits els paràmetres de l'aerogenerador, s'ha fet una petita simulació molt idealitzada per aproximar la potència elèctrica que el sistema proporcionaria al vehicle, ja que s'ha suposat que l'aerogenerador podrà funcionar en tot l'interval de velocitats de desplaçament del cotxe, fet que a la realitat probablement no serà possible, degut a que l'aerogenerador necessita una velocitat mínima del vent (*Cut-in speed*) per començar a produir energia, de manera que l'interval ja es veurà reduït.

A una velocitat de desplaçament de 50km/h (14m/s), la potència elèctrica serà:

$$P_{ELECTRICA} = \left(\frac{1}{2} \cdot 1{,}18 \cdot 0{,}25 \cdot 14^3\right) \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}95 = 54{,}8W \qquad \text{(Eq. 74)}$$

A la velocitat màxima del cotxe, que serà de 120km/h (33,3m/s), la potencia elèctrica serà:

$$P_{ELECTRICA} = \left(\frac{1}{2} \cdot 1{,}18 \cdot 0{,}25 \cdot 33{,}3^3\right) \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}95 = 737{,}33W \qquad \text{(Eq. 75)}$$

Obtinguts aquests resultats, tot i ser força aproximats, veiem que la producció elèctrica que pot tenir el sistema és molt baixa. Simulant la potència i energia obtinguda durant un cicle de conducció NEDC, s'obtenen les gràfiques següents:

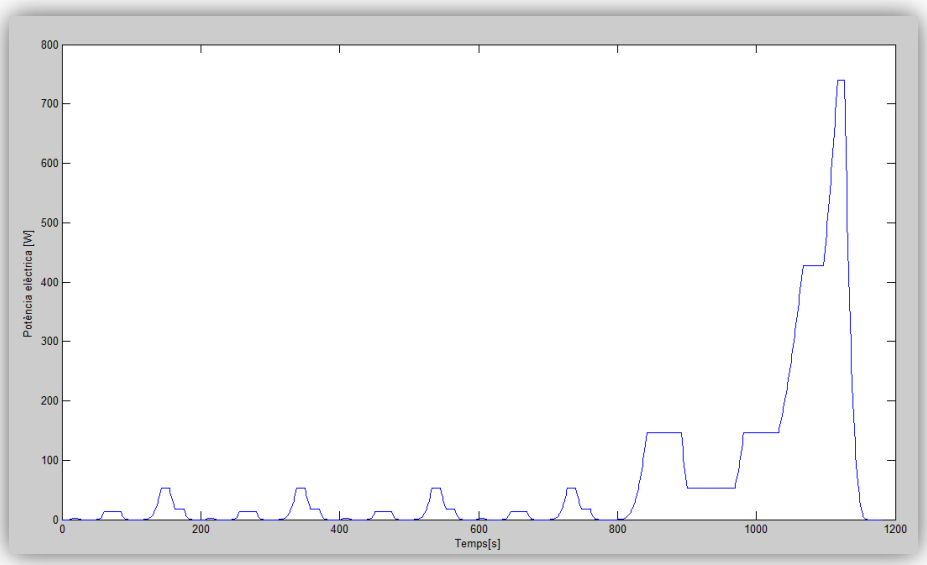


Figura 118. Potència elèctrica obtinguda per cicle de conducció NEDC. (Elaboració pròpia)

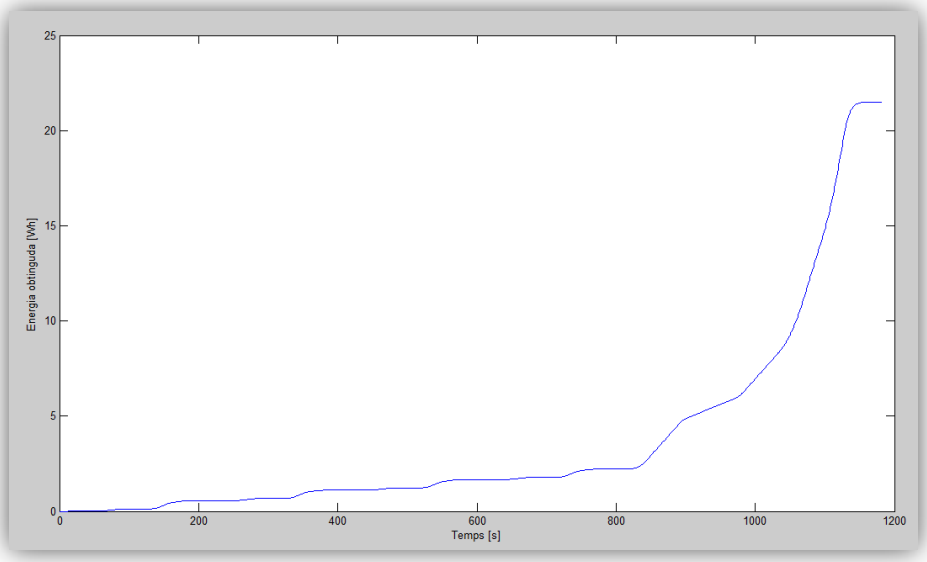


Figura 119. Energia obtinguda per cicle de conducció NEDC. (Elaboració pròpia)

A continuació es mostra el consum energètic del vehicle durant un únic cicle de conducció NEDC.

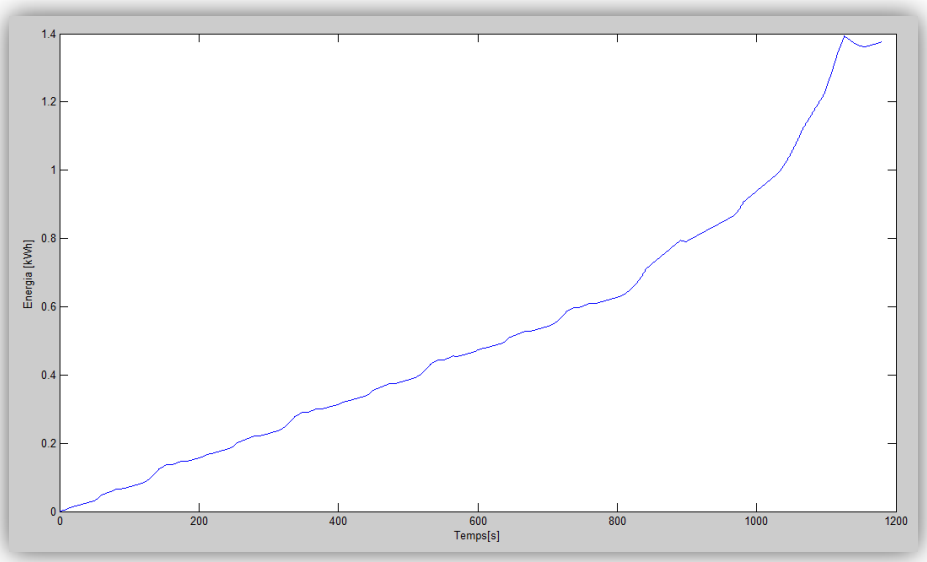


Figura 120. Energia elèctrica consumida en un cicle de conducció NEDC. (Elaboració pròpia)

Comparant aquestes dades, es verifica el que es suposava des d'un principi, i és que el benefici que l'energia eòlica pot aportar en aquest cas és escàs, ja que representa una quantitat d'energia propera a l'1,5% de l'energia consumida per cicle.

11.1.4. AVALUACIÓ DEL SISTEMA

Per avaluar correctament la rendibilitat del sistema eòlic, cal tenir en compte diferents aspectes que afecten a la decisió final sobre la incorporació o no del sistema. El més important és veure l'aportació energètica que té el sistema i que com s'ha pogut veure, és pràcticament insignificant si es compara amb el consum normal del vehicle.

La incorporació del sistema, implicaria un augment de pes del conjunt, que s'ha de tenir molt en compte ja que aquest és un factor important que afecta l'autonomia. També es veuria afectat el rendiment aerodinàmic del cotxe, és a dir al seu coeficient de resistència aerodinàmica (Cx), ja que la presència d'un aerogenerador generaria turbulències que augmentaria la resistència a l'avanç i per tant al consum energètic necessari per impulsar el vehicle. Per últim, un aspecte important és el sobre cost que suposaria la incorporació de l'aerogenerador i tots els components del sistema eòlic com serien la transmissió i el generador elèctric.

A continuació es valoraran cadascuna de les variables anteriors respecte a l'afectació que tenen durant un cicle de conducció.

11.1.4.1. Aportació energètica

L'aportació energètica del sistema per cada cicle de conducció NEDC es mostra a la Figura 120. En ella es pot veure que l'energia obtinguda és de 21,54Wh per cicle.

11.1.4.2. Efecte del pes

Aproximant el pes del sistema eòlic en uns 50kg de pes, podem simular el cost energètic que suposaria per al vehicle durant un cicle de conducció tal i com mostra la següent figura.

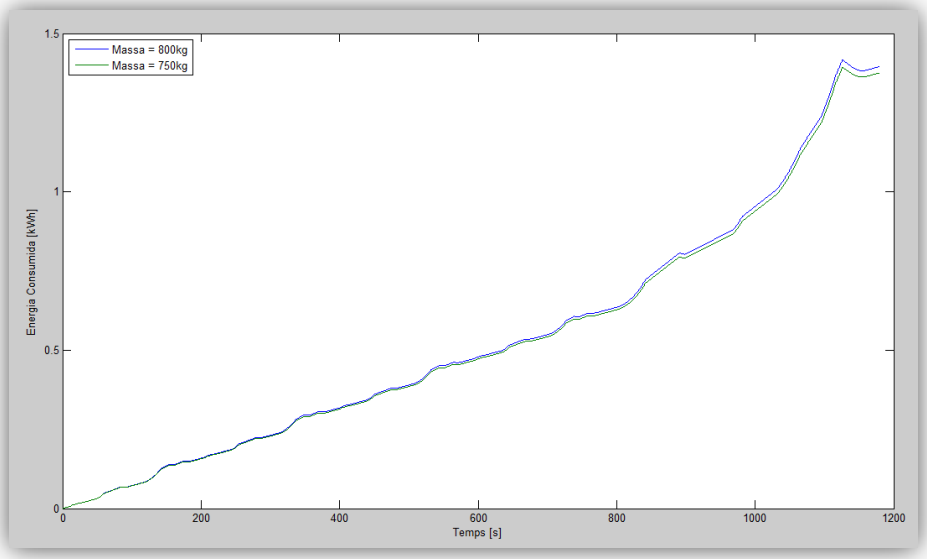


Figura 121. Consum energètic en un cicle de conducció NEDC amb una variació de massa de 50kg. (Elaboració pròpia)

El sobre consum d'energia que produeixen els 50kg de pes que s'han suposat per al sistema eòlic és de 19,7Wh, que és una quantitat molt propera a l'aportació que tindria el sistema, de manera que pràcticament no comportaria cap guany en l'autonomia i alhora en l'eficiència energètica.

11.1.4.3. Efecte sobre el Cx

Per veure com l'aerogenerador afectaria al coeficient de resistència aerodinàmica, caldria realitzar una simulació del vehicle incorporant el sistema per poder obtenir el Cx resultant. Aquesta comprovació no es realitzarà degut a que comporta una dificultat important, tant en quant al disseny de

l'aerogenerador, com a la posterior simulació CFD. Per modelitzar el captador serien necessaris uns coneixements de CAD força importants i caldria invertir molt temps. Aquest apartat no es realitzarà perquè la resta de variables que afecten a la decisió d'incorporar el sistema o no, ja permeten decidir amb prou claredat.

Atenent als resultats mostrats a la Figura 113, l'efecte que tindria un augment del Cx, seria relativament baix tal i com s'explica a l'apartat 10.2 però tenint en compte que es tracta d'un vehicle elèctric on l'autonomia és el seu principal handicap, cal evitar elements que tinguin un efecte negatiu.

11.1.4.4. Sobre cost

El sobre cost del sistema vindria degut a la necessitat d'incorporar nous elements com serien l'aerogenerador, la transmissió necessària per adequar la velocitat de rotació del captador a la velocitat idònia de funcionament del generador elèctric i el propi generador elèctric.

11.1.5. CONCLUSIONS

Una vegada analitzats tots els punts que afecten a la decisió d'incorporar el sistema de captació eòlica, i envers als resultats obtinguts, s'ha decidit prescindir d'aquest element degut a que energèticament no és rendible i amés comportaria una sèrie d'inconvenients que afectarien a l'autonomia final del vehicle.

11.2. SISTEMA CAPTACIÓ SOLAR

11.2.1. L'ENERGIA SOLAR

L'energia solar és l'energia produïda pel Sol com a resultat de les reaccions nuclears de fusió que hi tenen lloc. Aquesta energia arriba a la Terra a través de l'espai en forma de partícules subatòmiques d'energia anomenades fotons, que interactuen amb l'atmosfera i la superfície terrestres. La intensitat de la radiació solar a l'exterior de l'atmosfera, si es considera que la Terra està a la seva distància mitjana del Sol, es coneix amb el nom de constant solar, que no és pròpiament una constant, però està considerada així perquè oscil·la entre una marges molt petits, i té un valor mitjà de 1366W/m^2. La intensitat d'energia real disponible a la superfície terrestre és menor que la constant solar a causa dels fenòmens d'absorció i de dispersió de la radiació que s'originen com a conseqüència de la interacció dels fotons amb l'atmosfera.

11.2.1.1. Energia aprofitable del sol

La radiació solar és aprofitable en les seves components directa i difusa, o en la suma d'ambdues. La radiació directa és la que arriba directament del focus solar, sense reflexions o refraccions intermèdies. La difusa és conseqüència dels fenòmens de reflexió i refracció solar amb l'atmosfera, als núvols i a la resta d'elements atmosfèrics i terrestres. La radiació directa pot reflectir-se i concentrar-se per a la seva utilització, mentre que no és possible concentrar la llum difusa que prové de totes les direccions.

La potència de la radiació varia segons el moment del dia, les condicions atmosfèriques que l'esmorteeixen i la latitud. Es pot assumir que en bones condicions de radiació el valor és d'aproximadament 1000 W/m² a la superfície terrestre. Aquesta potència es coneix com irradiància.

11.2.1.2. Cèl·lules fotovoltaiques

La conversió d'energia solar a energia elèctrica la realitzen les cèl·lules fotovoltaiques. Aquestes cèl·lules són compostes d'un material que presenta efecte fotoelèctric, és a dir absorbeix fotons de llum i emet electrons. Quan aquests electrons lliures són capturats, el resultat és un corrent elèctric que pot ser utilitzat com a electricitat.

L'energia que és possible utilitzar depèn de les característiques del material que constitueix la cèl·lula. L'eficiència de conversió (percentatge d'energia continguda en les radiacions solars que és transformada en energia elèctrica disponible als borns) de les cèl·lules de silici disponibles al mercat, normalment està comprès entre el 13% i el 17%, mentre que en productes especials de laboratori s'ha aconseguit fins a un 32,5% d'eficiència.

La següent taula resum mostra les avantatges i desavantatges principals que presenten els diferents tipus de cèl·lules:

TIPUS DE CÈL·LULES	RENDIMENT	AVENTATGES	INCONVENIENTS
Silici Monocristal·lí	14-17%	Alt rendiment Tecnologia estable Fiabilitat	Necessitat d'utilitzar molt material per la fabricació Complexitat de fabricació
Silici Policristal·lí	12-14%	Menor cost Fabricació més senzilla	Complexitat de fabricació Sensibilitat a les impureses
Silici Amorf	6-8%	Menor cost Bon rendiment amb baixa radiació Panells flexibles	Baix rendiment
Arseniür de Gal·li	32,5% (experimental)	Alta resistència a les temperatures elevades	Toxicitat Disponibilitat del material
Tel·lurur de Cadmi	10%	Baix cost	Toxicitat Disponibilitat del material

Figura 122. Taula comparativa de les diferents tipologies de cèl·lules fotovoltaiques. (Font: Wikipedia)

Per calcular la potència elèctrica que pot produir un panell fotovoltaic, és necessari conèixer la seva potència de pic, que equival a la potència màxima del panell en condicions ideals d'irradiància (1000 W/m^2) i de temperatura (25ºC).

$$P_{PIC} = 1000\, {}^{W}/_{m^2} \cdot \eta_{CÈL\cdot LULES} \qquad \text{(Eq. 76)}$$

L'expressió de la potència elèctrica seria:

$$P_{ELECTRICA\ PANELL} = P_{PIC} \cdot A_{PANELL} \qquad \text{(Eq. 77)}$$

Per calcular l'energia, degut a que la intensitat de la radiació no és constant durant el dia, s'utilitza el concepte d'hores de pic solar (HPS), que és una unitat que mesura la irradiació solar i que es defineix com el temps en hores d'una

hipotètica irradiància solar constant de 1000 W/m^2. El nombre d'HPS varia en funció de la latitud i l'energia equivalent a una HPS és de 1kWh/m^2. L'energia diària obtinguda dels panells serà:

$$E_{DIARIA} = P_{ELECTRICA\ PANELL} \cdot HPS \qquad \text{(Eq. 78)}$$

11.2.2. CONCEPTES DE VEHICLE SOLAR

El sistema de captació solar que es vol implementar, consistiria en cobrir part de la superfície exterior del cotxe (sostre, capó, laterals, etc.) amb panells solars per tal d'obtenir la màxima energia possible i, en funció de la quantitat captada, aprofitar-la per alimentar o bé el motor de tracció o els sistemes auxiliars del vehicle.

El tipus de vehicles solars existents es poden dividir en dues categories, en primer lloc hi ha els que no disposen de bateries perquè funcionen únicament amb l'energia del sol i que tenen l'inconvenient, que si circulen per zones d'ombra o si és de nit no poden funcionar. Aquests vehicles només es construeixen per als grans Ral·lis Solars, ja que són poc útils a la vida quotidiana. Aquesta solució no és compatible amb la idea de vehicle que es proposa en aquest projecte.

Figura 123. Vehicle solar participant a la competició World Solar Challenge australiana.

En segon lloc, hi ha els vehicles que utilitzen els panells solars per acumular energia a la bateria, aportant una gran part de l'energia que es requereix per al funcionament del motor, o que simplement incorporen algun panell per mantenir la temperatura de la bateria o efectuar petites recàrregues. El Toyota Prius, amb possibilitat d'incorporar un panell solar al sostre per mantenir la bateria a la seva temperatura òptima de funcionament, seria un exemple d'aquest segon tipus de

vehicles solars i s'aproxima més a la idea que es pretén implementar en aquest projecte.

Figura 124. Toyota PRIUS amb sostre solar.

La següent figura mostra el prototip Fiat Phylla, que es tracta d'un híbrid entre vehicle elèctric amb pila d'hidrogen, i vehicle solar, ja que té part de la carrosseria coberta de panells fotovoltaics.

Figura 125. FIAT Phylla.

El FIAT Phylla, representa el concepte de sistema de captació solar que es vol equipar al vehicle elèctric a dissenyar, ja que aprofita la màxima superfície possible de la carrosseria per obtenir energia solar.

11.2.3. CARACTERISTIQUES DEL SISTEMA

El sistema de captació solar que es vol proposar en aquest projecte consistiria en cobrir part de la carrosseria del vehicle amb panells fotovoltaics per maximitzar la superfície de captació. Perquè aquesta solució sigui factible, s'ha

de tenir en compte que les cèl·lules fotovoltaiques a instal·lar han de ser flexibles per tal d'adaptar-les a la curvatura de la carrosseria. Aquest aspecte és molt important perquè obliga a decantar-se per una solució composta de plaques de Silici amorf, ja que de moment és l'únic material que permet obtenir panells flexibles. Un altre avantatge que presenta el silici amorf és que el rendiment es veu poc afectat quan hi ha baixa radiació, ja que també és capaç de captar la radiació difusa. Per contra, un inconvenient important és que les cèl·lules de Silici amorf són les que presenten el rendiment més baix.

Per tant, per contrarestar l'efecte del baix rendiment del silici amorf, cal maximitzar la superfície de captació solar, de manera que s'implantaran panells fotovoltaics a les següents zones del vehicle:

Sostre:

Tal com mostra la següent imatge, la superfície disponible per a la instal·lació de panells solars al sostre és de 1,92m^2.

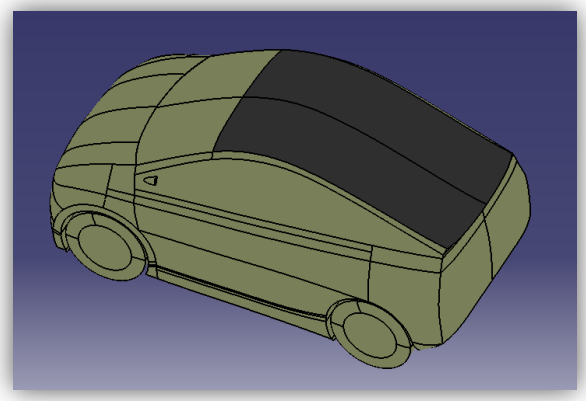


Figura 126. Superfície disponible per a panells solars al sostre.

Capó:

La imatge següent mostra la superfície disponible al capó, que és de 0,85m^2.

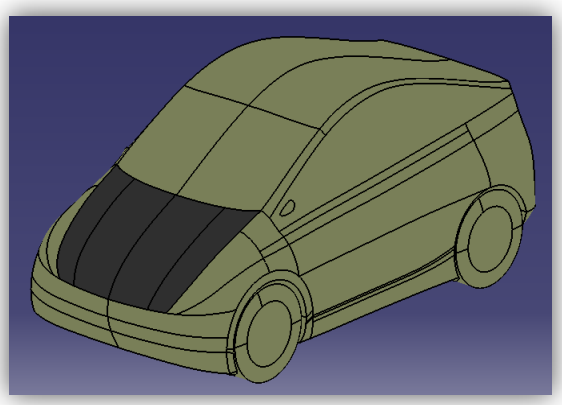


Figura 127. Superfície disponible per a panells solars al capó.

Laterals:

La superfície disponible a cada lateral del vehicle, mostrada per la imatge següent, és de 1,115m^2, de manera que la superfície lateral total és de 2,23m^2.

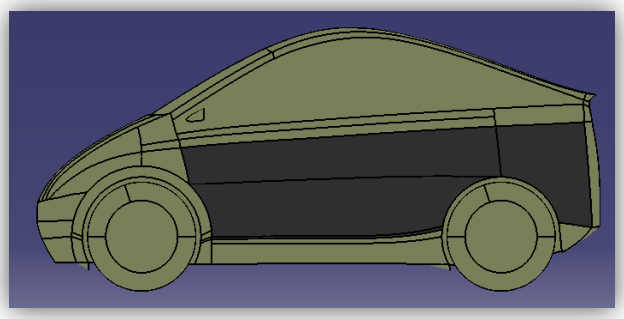


Figura 128. Superfície disponible per a panells solars a cada lateral.

En resum, la superfície total disponible per als captadors solars és de :

$$S_{TOTAL} = S_{SOSTRE} + S_{CAPÓ} + S_{LATERAL} = 5m^2 \qquad \text{(Eq. 79)}$$

Cal tenir en compte que la posició dels panells, tant del sostre com del capó i sobretot dels laterals, al no ser totalment horitzontal respecte al terra, produirà pèrdues degudes a la orientació i inclinació, ja que els raigs solars no incidiran perpendicularment als panells.

Per a la realització dels càlculs no es tindrà en compte aquesta pèrdua de rendiment, ja que també es pot donar el cas que en un moment determinat i segons la posició del cotxe, la radiació incideixi directament a la zona lateral i en

altres moments, aquesta part quedi a l'ombra. Per tant, els càlculs que es mostren a continuació es basen en la suposició que els panells treballen en condicions òptimes per tal d'obtenir l'energia màxima.

Els paràmetres a definir per realitzar els càlculs són:

- La potència de pic, dels panells de silici amorf suposant el seu rendiment màxim, equival al 8% del valor d'irradiància i per tant és de 80W/m^2.
- La superfície de captació disponible al vehicle és de 5m^2.
- El valor d'HPS, a la localització de Barcelona és de 5,1h.

La potència que donaria el sistema amb unes condicions meteorològiques ideals seria:

$$P_{ELECTRICA\ PANELLS} = 80 \cdot 5 = 400W \qquad \text{(Eq. 80)}$$

L'energia obtinguda en un dia seria:

$$E_{DIARIA} = 400W \cdot 5{,}1h = 2040Wh \qquad \text{(Eq. 81)}$$

11.2.4. AVALUACIÓ DEL SISTEMA

Per avaluar correctament la rendibilitat del sistema solar, cal tenir en compte diferents aspectes que afecten a la decisió final sobre si s'incorpora o no el sistema. L'aportació energètica calculada a l'apartat anterior, no és gens menyspreable, això sí, cal tenir en compte que aquesta energia s'ha calculat a partir d'un procediment molt idealitzat.

En primer lloc, s'ha considerat que es poden instal·lar panells a tota la superfície identificada a les imatges de l'apartat anterior, la qual cosa sembla difícil d'assolir sobretot a la zona de les portes i laterals.

En segon lloc, si bé el silici amorf pateix poca variació de rendiment a nivells baixos de radiació, molt possiblement aquest es veurà afectat per la orientació i inclinació dels panells, ja que no són optimes degut a que la posició ve definida per la carrosseria del vehicle.

També s'ha de considerar la possibilitat que el vehicle circuli per zones d'ombra, aspecte força freqüent si es circula per zones urbanes degut a la presència d'edificis, si s'utilitza el cotxe durant un dia amb condicions atmosfèriques adverses o fins i tot si es fa servir de nit. En aquests casos, l'aportació energètica del sistema serà escassa.

Respecte a l'increment de pes que el sistema aportaria al vehicle, aquest seria molt baix. El sistema consta dels panells, en forma de làmines que pràcticament no suposarien pes extra, i el regulador de càrrega, que sí que tindrà un pes determinat. De manera que caldrà considerar el cost energètic extra degut a l'increment de pes que comportaria el sistema.

Un aspecte important que podria aportar el sistema, és la possibilitat d'utilitzar aquesta energia obtinguda del sol, per el condicionament tèrmic tant de l'habitacle del cotxe com de les bateries. Aquesta solució més enllà de servir per augmentar l'autonomia, s'utilitzaria per augmentar el confort de l'usuari, que també és un aspecte molt important a tenir en compte.

11.2.4.1. Aportació energètica

L'aportació energètica del sistema en condicions ideals, a la localització de Barcelona, que té un valor d'HPS de 5,1h, seria de 2,04kWh diaris.

11.2.4.2. Efecte del pes

Aproximant el pes del sistema solar en uns 50kg de pes, l'efecte que tindria en l'autonomia seria el mateix que el sistema de captació eòlica, el qual s'explica a l'apartat 11.1.4.2, i que es quantifica en un sobre cost energètic de 19,7Wh per cada cicle de conducció NEDC.

11.2.4.3. Efecte de la refrigeració

El sistema de refrigeració, és un sistema que té molta importància en els vehicles elèctrics. En primer lloc pel que fa al funcionament del motor i el controlador, ja que és important evacuar la calor que generen per no malmetre l'electrònica de potència ni perjudicar el rendiment del motor.

En segon lloc, les bateries que durant el seu funcionament i degut als processos electroquímics que es produeixen al seu interior, desprenen molta calor que ha de ser evacuada per no comprometre ni el seu rendiment ni la seguretat, ja que una mala refrigeració podria comportar incendis i explosions molt perilloses. Amés, és molt important que les bateries es mantinguin a una temperatura el més constant possible al voltant dels 23ºC-25ºC, ja que és a la temperatura que ofereixen millor rendiment i fa que es maximitzi la seva vida útil.

Per últim, la climatització de l'habitacle, és un aspecte important alhora de mantenir el confort dels usuaris, sobretot si es troben en ambients climatològicament hostils (freds i càlids). Amés els vehicles elèctrics presenten l'agreujant que l'ús continuat dels sistemes de climatització, tant per calefactar com per refrigerar, afecten dràsticament l'autonomia final del cotxe.

Per aquests motius, el sistema de captació solar permetria aportar diàriament una quantitat d'energia important que es podria utilitzar per accionar els sistemes de climatització i refrigeració del vehicle en condicions de funcionament normal. Amés, en situacions en que el vehicle estigui aturat i estacionat a l'aire lliure, a ple sol o en un ambient fred, és important que el sistema de refrigeració/calefacció de la bateria segueixi funcionant per evitar un sobre escalfament que malmeti els sistemes, de manera que els captadors solars aportarien l'energia necessària per al seu accionament.

11.2.4.4. Efecte en el cost

La instal·lació dels panells fotovoltaics al vehicle així com el regulador de càrrega i control, suposaria un cost extra important. S'ha de tenir en compte que l'energia solar no és una energia barata i amés ofereix rendiments molt baixos.

En el cas que s'utilitzés el sistema per refrigerar les bateries quan el vehicle estigui estacionat, es contribuiria a evitar un deteriorament accelerat de les bateries així com possibles accidents que les deixin inservibles. Això comportaria danys irreversibles al vehicle o en el millor dels casos únicament a les bateries, amb el cost que això comportaria per a l'usuari. De manera que el cost del sistema seria molt inferior al cost que podria tenir substituir les bateries o el propi vehicle

11.2.5. CONCLUSIONS

En definitiva, avaluant tots els aspectes que afecten la decisió d'incorporar el sistema, i valorant molt positivament tant l'aportació energètica del sistema, com la utilitat que se li podria donar per a l'accionament dels sistemes de refrigeració en situacions on el vehicle estigui aturat i estacionat, s'ha decidit incorporar aquest sistema al vehicle.

12. CONSIDERACIONS DEL VEHICLE ELÈCTRIC

12.1. INTRODUCCIÓ

En el marc d'un sector del transport caracteritzat per un elevat consum de combustibles fòssils i un fort impacte ambiental, la promoció del vehicle elèctric es presenta com una de les vies, per avançar cap a la sostenibilitat del sector.

En aquest marc, la Unió Europea s'enfronta a un ambiciós triple objectiu:

1. Fomentar la competitivitat de la seva economia en un context de crisi econòmica.
2. La protecció del medi ambient, fortament enfocada en la reducció de les emissions de gasos d'efecte hivernacle (GEI).
3. La seguretat de subministrament, que el seu principal objectiu és la dependència energètica de combustibles fòssils provinents de l'exterior.

El compromís més visible a mig termini en termes energètics i mediambientals és el compliment dels objectius europeus "20/20/20" al 2020:

- 20% reducció d'emissions de GEI de forma vinculant.
- 20% de participació d'energies renovables de forma vinculant.
- 20% de millora de l'eficiència energètica.

Si es volen aconseguir aquests objectius europeus, caldrà realitzar grans esforços en el sector del transport, ja que és el principal consumidor d'energia de tota l'economia, i depèn en més d'un 90% dels combustibles fòssils.

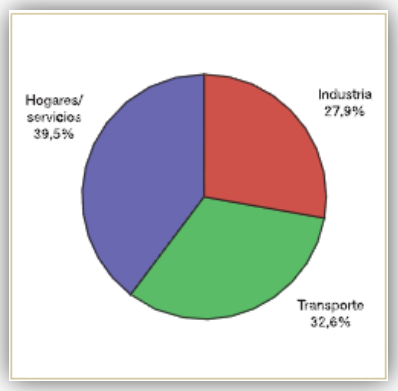


Figura 129. Consum d'energia final a la UE 27. (Font: EUROSTAT)

Al gràfic anterior, es pot observar com el transport representava el 32,6% del consum total energètic de la UE al 2007. El sector del transport genera un 24,4% de les emissions totals de CO2, havent registrat un increment del 23,6% entre

1990 i 2007. El principal origen de les emissions en aquest sector, prové del transport per carretera, ja que suposa el 94% del total.

La importància del transport com a sector econòmic i el seu pes en el consum energètic i en les emissions, fan que hagi de ser un dels eixos principals de les polítiques públiques si es pretenen aconseguir els objectius de política econòmica (competitivitat), ambiental (emissions de GEI) i energètica (seguretat de subministrament).

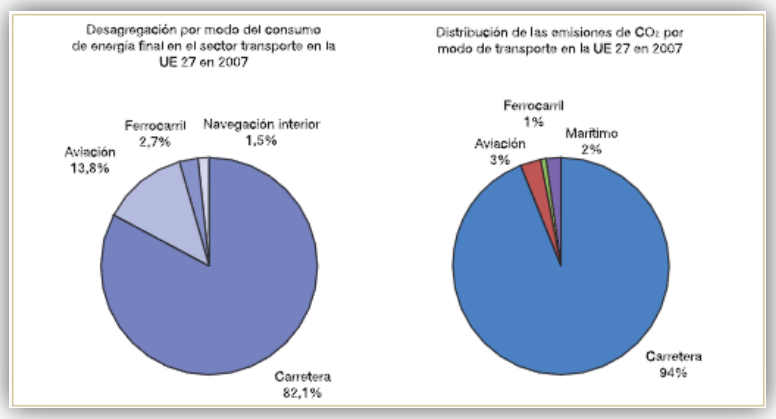


Figura 130. Consum d'energia final al sector transport i distribució de les emissions a la UE 27 al 2007.
(Font: EUROSTAT i Agència Europea del Medi ambient)

Els beneficis en termes d'eficiència energètica del vehicle elèctric, pràcticament el doble que la del vehicle amb motor de combustió interna tradicional, i la seva menor intensitat d'emissions de GEI per quilòmetre, justifiquen la promoció del vehicle elèctric com una prioritat de les polítiques energètiques i de R+D+i dels estats membres de la UE.

El vehicle elèctric permet reduir el consum de combustibles fòssils i les emissions en el sector del transport, degut a la major eficiència energètica de la seva tecnologia. A més, els vehicles elèctrics endollables a la xarxa elèctrica, siguin purs o híbrids, facilitaran la penetració de les energies renovables per la producció d'electricitat, en un sector en el qual és molt difícil la seva introducció.

12.2. EFICIÈNCIA ENERGÈTICA DEL VEHICLE ELÈCTRIC

Un dels objectius de sostenibilitat energètica que pot veure's afavorit per la introducció massiva del vehicle elèctric és el de l'eficiència energètica. Com ja s'ha comentat, una dels principals avantatges dels automòbils amb motor elèctric és la seva alta eficiència, que es tradueix, a més, en una contribució a la

reducció de la dependència que té el transport rodat dels combustibles fòssils, amb el conseqüent impacte ambiental positiu en termes de reducció d'emissions.

Per realitzar un anàlisi d'eficiència entre un vehicle elèctric i un de convencional, s'ha d'estudiar l'eficiència de cada opció tenint molt clara la fase del cicle de vida que s'està utilitzant. En aquest sentit, la comparació d'alternatives de combustió interna amb altres de tracció elèctrica és complexa ja que les seves fonts energètiques, i per tant els seus cicles de vida, són diferents.

En el cas del vehicle amb motor de combustió, s'acostuma a calcular l'eficiència del tram "Dipòsit - rodes", que consisteix a calcular-la per a la fase que va des del dipòsit, on està emmagatzemat el combustible a la benzinera, fins a l'energia mecànica final obtinguda, que permet moure les rodes. Això és així perquè s'utilitzen combustibles la transformació energètica dels quals es produeix al propi vehicle mitjançant els motors de combustió.

Per als vehicles elèctrics, es sol calcular l'eficiència energètica del "tram Planta - rodes", que mesura l'eficiència des que el combustible s'introdueix a la planta de producció elèctrica fins que aquesta electricitat s'utilitza per moure les rodes (inclou el procés de generació, transport i distribució d'electricitat, càrrega de la bateria i producció d'energia mecànica mitjançant el motor elèctric). En aquest cas, influeix de manera important la suposició que es faci respecte a la forma de producció de l'energia elèctrica, ja que una central tèrmica pot tenir una eficiència lleugerament superior al 50% i una altra a partir de fonts renovables del 100%. Així, en el cas del BEV és més adequat realitzar una anàlisi d'aquest tram, ja que el seu subministrament prové, en gran part, d'electricitat provinent d'un procés de transformació d'energia primària (renovables, gas o carbó) en energia final (electricitat) en una planta de generació elèctrica.

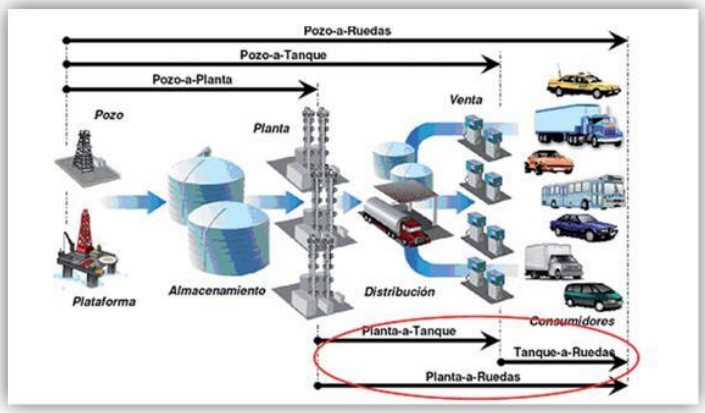


Figura 131. Fases d'anàlisi de l'eficiència energètica dels vehicles. (Font: WWF ADENA)

Segons les dades que es mostren a la següent figura, el vehicle convencional de gasolina (ICE), amb motor de combustió interna, té una eficiència global del 25%. És a dir de l'energia del combustible introduït al vehicle, només s'obté en forma d'energia mecànica per al moviment de les rodes el 25%, desaprofitant-ne el 75% restant per fregaments dins del motor o a la transmissió, o els propis factors termodinàmics limitadors del rendiment en els motors d'explosió.

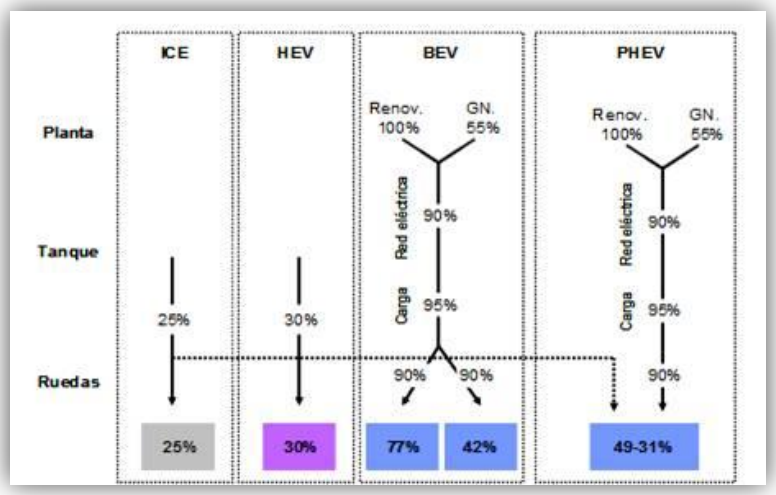


Figura 132. Anàlisi de l'eficiència al "Dipòsit - rodes" (ICE, HEV) i "Planta - rodes" (Part elèctrica del PHEV i BEV). (Font: Cuadernos de energia nº26)

Per la seva banda en el vehicle híbrid (HEV), la introducció d'un motor elèctric a més del convencional, contribueix a la millora de l'eficiència energètica fins a aconseguir nivells del 30%. En el cas del BEV, les estimacions mostren una eficiència que arriba al 77% si l'electricitat que carrega les bateries del cotxe té un origen completament renovable i un 42% si el mix de generació elèctrica està basat en gas natural. Lògicament, el PHEV, ja que presenta una combinació de motor convencional i elèctric tindrà una eficiència mixta entre el 31-49%, segons la utilització que se'n faci, molt superior a la del vehicle convencional o l'híbrid tradicional.

L'anàlisi realitzada fins ara està basat en dades de les tecnologies actuals. No obstant això, per veure com pot contribuir en un futur cada opció en la reducció del consum global de combustibles fòssils del sector transport és convenient realitzar un anàlisi prospectiu de l'estalvi de combustible proporcionat per cadascuna de les opcions tecnològiques considerades enfront del vehicle convencional. Aquest anàlisi quantitatiu l'ha dut a terme el *MIT*[24] al seu informe

[24] *MIT - Massachusetts Institute of Technology.*

"*On the road in 2035*" (9) publicat al juliol del 2008, i els principals resultats es presenten a continuació.

Sistema de propulsión	MJ/km	Consumo de energía respecto al vehículo actual de gasolina (%)	Consumo de energía respecto al vehículo en 2035 de gasolina (%)
2035 Gasolina	1,77	62	100
2035 Diésel	1,52	53	86
2035 Turbo Gasolina	1,56	55	88
2035 HEV	0,99	35	56
2035 PHEV	0,71	25	40
2035 BEV	0,54	19	31

Figura 133. Consum equivalent d'energia al tram "Dipòsit - roda" per a cada tipus de vehicle al 2035 (Font: MIT)

Com es mostra a la taula, en el futur s'aconseguiran considerables millores d'eficiència en totes les tecnologies. A la simulació per al 2035, el HEV suposa una estalvi energètic del 65% enfront del vehicle de gasolina convencional actual. Per a aquesta data, aquests estalvis es van incrementant amb el PHEV, que consumeix un 25% del petroli que consumiria un vehicle actual de gasolina i el BEV, amb un consum del 19% enfront del vehicle de referència. Per tant, les previsions apunten al fet que les majors eficiències relatives dels diferents tipus de vehicles amb tracció elèctrica es mantindran o augmentaran a mig termini respecte als de combustió interna.

Dins d'aquests, el PHEV es presenta com l'opció amb major potencial a curt termini, perquè permet la connexió a la xarxa elèctrica, sense necessitats de grans adaptacions a les infraestructures del sistema elèctric, i permetent a l'usuari mantenir la seva independència, ja que el fet de disposar d'un motor convencional estén el rang d'autonomia.

12.3. L'ECONOMIA DEL VEHICLE ELÈCTRIC

A l'apartat anterior s'ha analitzat un dels aspectes dinamitzadors del vehicle elèctric, com és la seva major eficiència energètica. Si s'analitza des del punt de vista econòmic i més concretament des del punt de vista del consumidor, es mostra al vehicle elèctric com una opció a considerar pel seu avantatge relatiu de costos davant un vehicle convencional, sempre tenint en compte el perfil del conductor (distàncies recorregudes, utilització, tipologia dels recorreguts, etc.).

L'informe "*On the road in 2035*" realitza una aproximació general al cost que un consumidor hauria d'assumir per l'adquisició d'un vehicle elèctric en lloc d'un vehicle convencional. En aquest anàlisi s'estableixen dues referències temporals: l'actualitat i l'any 2035, on s'analitza la tipologia de vehicles potencialment disponibles.

El cost de producció

A l'anàlisi actual, s'aprecia que en els vehicles que disposen de millores en l'eficiència energètica existeix un sobre cost respecte a un vehicle basic[25], que va dels 2.650 € en el cas d'un vehicle de gasolina, als 5.430 € per a un vehicle híbrid. Per als vehicles dièsel i gasolina, el major cost de producció té el seu origen bàsicament en les modificacions que cal introduir als motors per aconseguir aquesta major eficiència. En el cas dels vehicles elèctrics, el sobre cost respecte al vehicle bàsic depèn en gran mesura de la capacitat de la bateria, que és la principal causant d'aquest sobre cost.

L'escenari al 2035 mostra com les opcions convencionals de gasoil i gasolina han anat millorant progressivament la seva eficiència energètica, amb l'objectiu de competir amb els vehicles elèctrics. Aquestes millores impliquen assumir un sobre cost de producció, principalment degut a millores al motor, però també en la modificació de materials i dissenys per reduir el pes del conjunt. En els vehicles elèctrics, el sobre cost del BEV és superior als 12.000€, derivat fonamentalment del cost de les bateries, que representa un 80% d'aquest sobre cost. De manera que l'evolució del cost de les bateries tindrà una incidència decisiva en la competitivitat relativa dels vehicles elèctrics. En aquest sentit, les projeccions en relació als costos de les bateries mostren una tendència marcadament decreixent, passant d'un escenari mig de 1.100€/kWh de capacitat d'emmagatzematge al 2006 a uns 200€/kWh al 2035.

El cost de funcionament

En segon lloc, després de tenir una noció en quant al sobre cost en la producció d'un vehicle elèctric, es pretén comparar el cost per quilòmetre d'un vehicle convencional respecte a un d'elèctric. Una vegada conegut, es podrà determinar el període de recuperació de la major inversió del cotxe elèctric i, d'aquesta manera, comparar l'economia d'ambdós models.

En principi, les estimacions del MIT situarien el cost d'un vehicle elèctric pur al 2035 en 20.600€, al voltant d'12.000€ més car que un vehicle base amb la

[25] *"On the road in 2035", estima que el cost d'aquest vehicle basic és de 8.200€..*

tecnologia convencional. Aquest major cost té un impacte sobre l'amortització[26], que és més del doble en un BEV que en un vehicle convencional, amb 0,04€ per quilòmetre i 0,096€ respectivament. De fet, l'amortització representa la partida principal dels costos totals per quilòmetre del vehicle elèctric, que equival a tres quartes parts del mateix.

Com s'ha comentat, el major cost inicial del vehicle elèctric respecte el convencional prové de les bateries. A l'informe del MIT, que s'agafa com a base per elaborar aquesta estimació, s'assumeix un cost de la bateria de 200€ per kWh per als BEV. D'aquesta forma, una reducció del cost de les bateries per sota d'aquesta estimació contribuiria de forma important a reforçar la competitivitat de l'elèctric enfront del convencional.

En quant al consum d'energia, el vehicle convencional registra un cost molt superior al vehicle elèctric. Considerant un consum del vehicle convencional de 7 litres per cada 100 quilòmetres i un preu de la gasolina d'1,50€ per litre, s'obté un cost de 0,105€ per quilòmetre, xifra molt superior als 0,01€ per quilòmetre del BEV, considerat un consum de 0,15 kWh per quilòmetre i un preu de l'electricitat de 0,068€ per cada kWh. Aquest cost de l'electricitat coincideix amb el preu actual a Espanya considerant una tarifa nocturna, hipòtesi molt plausible atès que aquest tipus de vehicles hauria de tendir a carregar-se a la nit, quan l'electricitat és més barata i el cotxe està aturat. En aquest supòsit, tampoc es consideren costos fixos del subministrament, considerant que la càrrega nocturna no implica per al consumidor contractar major potència per al seu subministrament, ja que a la nit no es realitza pràcticament cap consum.

Considerant els costos de manteniment similars als que s'inclouen a l'informe de *McKindsey* (10), s'obtindria un cost total d'operació per quilòmetre de 0,175€ per al vehicle convencional, molt superior als 0,126€ del vehicle elèctric puro.

D'aquest anàlisi ja es desprèn una primera conclusió important i és que, considerant tots els costos, de producció i d'operació, i amb les hipòtesis utilitzades, el vehicle elèctric serà més econòmic en el futur. D'aquesta manera, encara que el vehicle elèctric seguirà tenint un cost inicial superior, a mesura que es vagin recorrent quilòmetres s'anirà compensant aquest sobre cost inicial.

[26] *Suposant una vida útil de 15 anys i recorregut anual de 20.000 quilòmetres.*

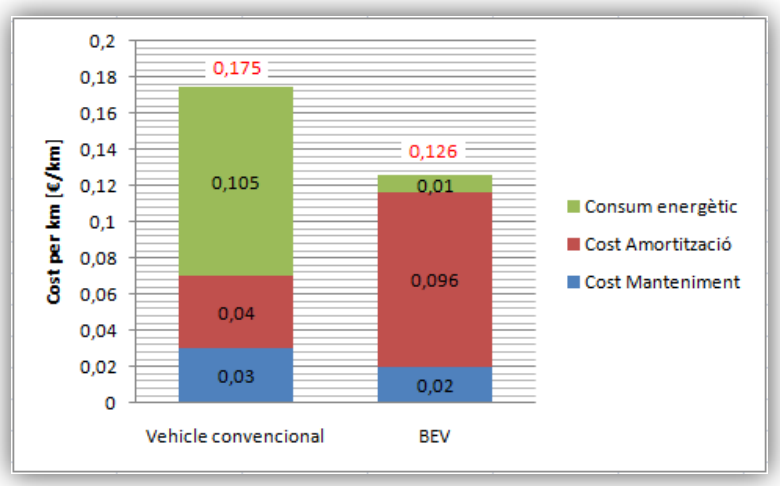


Figura 134. Comparativa dels costos totals per quilòmetre entre un vehicle convencional i un BEV al 2035. (Font:MIT)

Actualment a l'hora d'adquirir un vehicle, el consumidor s'enfronta inicialment al cost d'adquisició. El cost mig d'un vehicle elèctric pur, descomptant l'ajuda pública a la qual aspiraria el consumidor a l'actualitat[27], podria tenir un cost d'adquisició per a l'usuari de 25.000€. Un model equivalent de combustió interna, li podria suposar un cost inicial de 14.000€. Com s'aprecia, el sobre cost inicial és considerable.

Un consumidor racional, continuarà analitzant quantitativament ambdues opcions considerant el seu perfil com a conductor. En aquest cas, s'utilitza un exemple de conductor mitjà que realitza entorn els 20.000 quilòmetres anuals.

Recórrer aquesta distància anual porta associat un important consum energètic, per la qual cosa aquesta variable juga un paper molt rellevant per determinar la viabilitat econòmica de l'adquisició d'un vehicle elèctric. El cost de 0,105€ per quilòmetre, és molt superior als 0,01€ per quilòmetre del vehicle elèctric.

Agregant a els costos energètics uns costos de manteniment lleugerament superiors en el vehicle convencional (0,03€ per quilòmetre) enfront de l'elèctric (0,02€ per quilòmetre), s'obté un cost variable per al vehicle elèctric de 0,03€ per quilòmetre, xifra molt inferior als 0,135€ del vehicle convencional.

[27] *S'ha considerat una ajuda de 6.000€ per vehicle. Veure Reial decret 648/2011, de 9 de maig, pel qual es regula la concessió directa de subvencions per a l'adquisició de vehicles elèctrics durant 2011, en el marc del Pla d'acció 2010-2012 del Pla integral d'impuls al vehicle elèctric a Espanya 2010-2014.La vigència del qual s'ha ampliat fins a finals del 2012.*

D'aquesta manera, sota les suposicions utilitzades dels preus energètics i el perfil del conductor, es trigaria una mica mes de 5 anys en compensar el sobre cost inicial de l'adquisició del vehicle elèctric respecte al vehicle convencional, degut principalment al menor consum energètic del primer. A la següent figura, es mostren els costos totals d'ambdues opcions i el seu punt de tall proper als 104.000 quilòmetres.

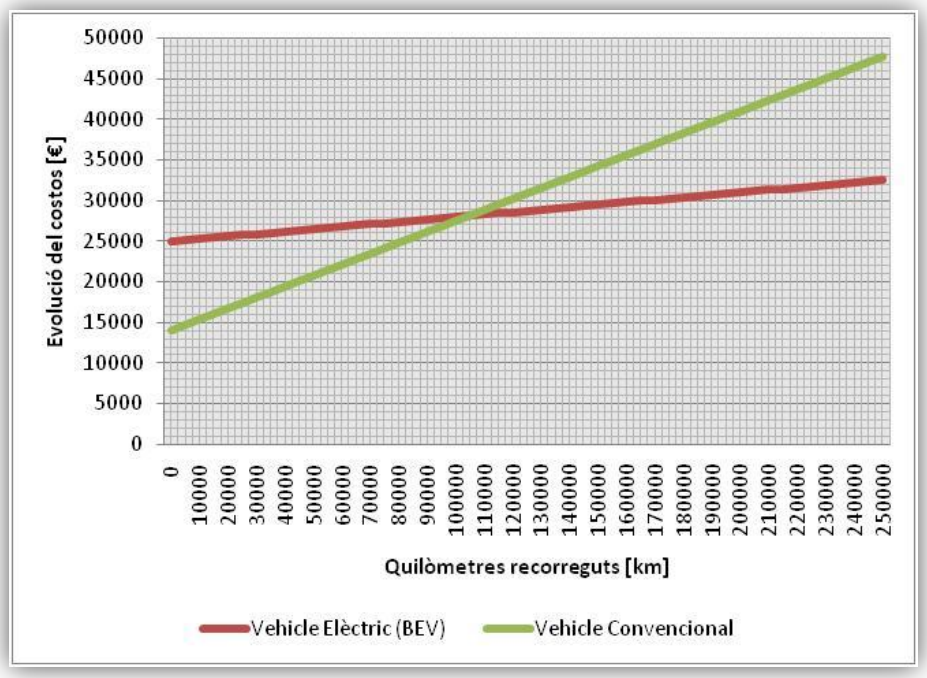


Figura 135. Comparativa de l'evolució dels costos d'un vehicle elèctric i un vehicle convencional. (Elaboració pròpia)

Aquesta dada és molt important, ja que el parc automobilístic es renova, aproximadament cada quinze anys[28], xifra molt superior als 5 anys a partir dels quals el vehicle elèctric comença a ser més econòmic que el convencional i amés coincideix amb la vida útil considerada en l'actualitat per a les bateries de liti.

El sobre cost inicial del vehicle elèctric es pot compensar abans o després segons les suposicions utilitzades. Per exemple, a menor utilització, més lluny estarà el punt de tall dels costos. Contràriament, el cost es compensarà abans si es produeix un increment del preu dels combustibles fòssils, un escenari molt probable a mig i llarg termini.

[28] *Suposició utilitzada a l'informe "On the road in 2035".*

12.4. IMPACTE SOBRE LES EMISSIONS

El canvi climàtic és un dels principals reptes als quals ha de fer front la humanitat a mig i llarg termini, i el sector del transport, especialment per carretera, es constitueix com el principal emissor de gasos d'efecte hivernacle de l'economia europea i espanyola.

El vehicle elèctric pot jugar un paper fonamental en la reducció d'emissions de GEI per dos motius fonamentalment.

- El vehicle elèctric, al ser més eficient, contribueix a reduir la intensitat d'emissions.
- L'electricitat és molt menys intensiva en emissions que els derivats del petroli (sobretot a Espanya que compta amb un mix diversificat i amb un pes molt important i creixent de les energies renovables i del gas natural, el combustible fòssil amb emissions més reduïdes).

Considerant els consums determinats anteriorment i les emissions del parc generador que produeix l'electricitat, estimant un mix futur del 40% renovable (compatible amb l'objectiu de la UE pel 2020 de 20% d'energies renovables sobre el total) i del 60% de cicles combinats, les emissions d'un vehicle elèctric se situarien lleugerament per sobre dels 3kg de CO2 per cada 100 quilòmetres. Comparant amb un vehicle convencional relativament eficient, amb un consum de 7 litres cada 100 quilòmetres, que tindria unes emissions de 16kg CO2 per cada 100 quilòmetres[29], el vehicle elèctric emetria menys d'una cinquena part de les emissions d'un vehicle convencional.

Per il·lustrar l'impacte global sobre les emissions que suposaria la implantació del vehicle elèctric al sector del transport a Espanya, es podria suposar una substitució de 3 milions de turismes de gasolina per turismes elèctrics purs. Considerant les dades de la Direcció general de trànsit[30], s'han estimat les emissions anuals del parc actual de turismes utilitzant els ràtios de consum energètic per vehicle i d'emissions per tipologia de vehicle dels apartats anteriors. Així, s'obté que aquesta substitució reduiria les emissions anuals del parc de turismes espanyol en un 12,3% respecte a les del parc actual[31]. Això es podria considerar, sens dubte, com una contribució molt important a la reducció

---

[29] Es consideren unes emissions de la gasolina de 2,32 kg de CO2 per litre.

30 Segons la Direcció general de trànsit, el parc de turismes a Espanya ascendeix a 21.755.753 vehicles, d'aquests 10.255.430 són de gasoil i 11.500.323 de gasolina.

[31] Considerant un consum energètic del vehicle elèctric de 0,2 kWh per quilòmetre la reducció d'emissions seria de l'11,3%.

d'emissions del sector del transport, que és un dels que més dificultats té en aquest sentit.

Cal destacar que els vehicles elèctrics, a part de tenir una elevada capacitat de reduir les emissions de CO2, també tenen un impacte positiu en la reducció d'altres gasos contaminants, potser menys coneguts, però molt perjudicials per a la salut, com són les partícules en suspensió (PM) i els òxids de nitrogen (NOx).

Aquests elements, als nuclis urbans, comporten menor desenvolupament pulmonar en la infància, problemes respiratoris en persones d'avançada edat, inflamació i irritació del tracte respiratori, empitjorament de problemes asmàtics i fins i tot morts prematures.

Espanya és un dels països amb pitjor qualitat de l'aire de la Unió Europea(11). El Ministeri de Medi ambient espanyol va xifrar en 16.000 les morts prematures que va causar la contaminació a Espanya al 2010, un número set vegades major que els morts en accidents de trànsit (1.710 l'any 2010).

Segons s'indica en alguns estudis(12), la reducció d'aquest tipus de compostos podria suposar una millora important en àmbits com el mediambiental o el relacionat amb la salut pública. Reduint els nivells de PM 2.5 a 20 pμ/m3 a Barcelona, Madrid, Bilbao, Sevilla i València, s'evitarien 11.375 morts.

A Barcelona, si es reduís el nivell actual de partícules PM10 de 50 pμ/m3 a 40pμ/m3, s'evitarien 1.200 morts anuals i 390 ingressos per malalties respiratòries.

Un altre aspecte important que presenten els vehicles elèctrics, és que no generen soroll. D'aquesta forma, la contaminació acústica, que acostuma a ser força important als nuclis urbans i que en gran part està originada pel trànsit, es veuria reduïda en gran manera.

12.5. ACCEPTACIÓ SOCIAL DEL VEHICLE ELÈCTRIC

La viabilitat econòmica del vehicle elèctric dependrà també del segment de mercat on es plantegi la seva introducció. L'anàlisi des del punt de vista del consumidor haurà de tenir en compte els diferents perfils de conductors existents.

Elevada utilització:

A la vista de les xifres de l'anàlisi econòmic, caracteritzat per un elevat cost inicial i un reduït cost variable per quilòmetre, sembla que el vehicle elèctric

podria ser més interessant per a usos més intensius (més quilòmetres), com podrien ser taxis, flotes d'empreses de distribució, vehicles de lloguer, etc.

Imatge corporativa:

Independentment d'un estricte anàlisi comercial, els vehicles elèctrics poden ser interessants per a empreses que vulguin oferir una imatge més compatible amb el medi ambient i la sostenibilitat.

Consciència ecològica:

Atès que el cotxe elèctric presenta al llarg de la seva vida útil, una diferència de costos relativament petita respecte al convencional, la possible diferència econòmica pot passar a un segon pla per a usuaris amb una consciència ecològica determinada, bàsicament per estalvi energètic o reducció d'emissions de CO2 que suposaria decantar-se per la opció elèctrica.

12.6. CONCLUSIONS

El vehicle elèctric contribueix positivament a la sostenibilitat ambiental del sector transport. D'una banda, disposa d'una eficiència energètica molt superior al vehicle convencional, i permet la penetració de les energies renovables al sector per abastir al transport per carretera, un àmbit amb enormes dificultats per a la seva introducció. És destacable que, amb les dades utilitzades, les emissions d'un vehicle elèctric per cada 100 quilòmetres poden ser cinc vegades més baixes que les d'un vehicle convencional.

Encara que existeix un sobre cost en l'adquisició d'un vehicle elèctric respecte el vehicle tradicional, això es veu compensat al llarg dels anys pels menors costos variables, tant pel consum energètic com pel manteniment, de manera que els possibles increments futurs en els preus dels combustibles fòssils podran jugar a favor de la viabilitat econòmica del vehicle elèctric. Segons les condicions descrites anteriorment, la major inversió inicial es compensa en poc més de 5 anys, considerant el preu actual del combustible, degut als menors costos d'utilització.

És necessari destacar que l'anàlisi de la viabilitat econòmica del vehicle elèctric comporta una complexitat molt elevada, derivada de l'evolució de les polítiques públiques, del perfil d'utilització del vehicle, de l'evolució dels mercats energètics i de la tecnologia, etc.

13. PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE

La planificació del projecte, s'ha organitzat cronològicament de la següent manera:

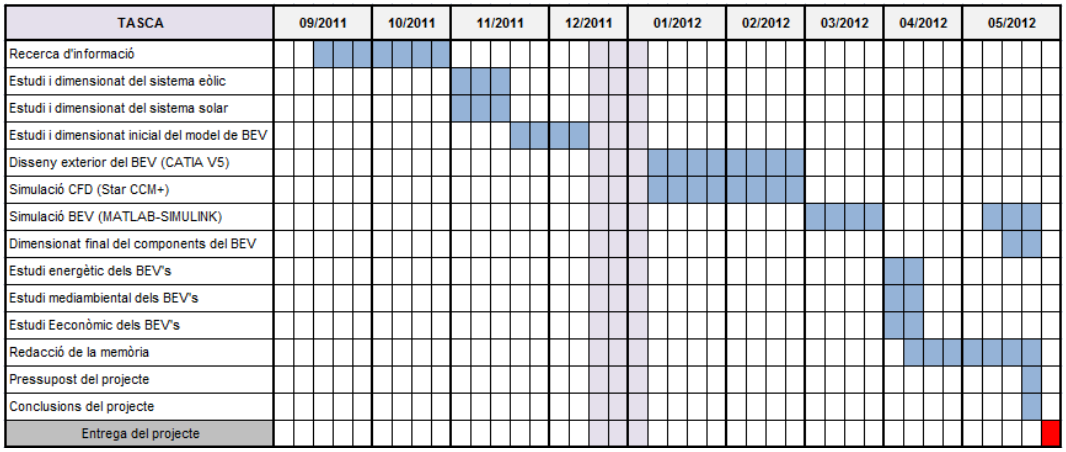


Figura 136. Planificació cronològica del projecte.

La durada total del projecte ha estat d'uns nou mesos aproximadament. En aquest temps s'han desenvolupat tots els apartats dels que consta aquesta memòria. Els aspectes del projecte que han requerit major temps de dedicació han estat els següents:

Recerca d'informació:

La obtenció d'informació s'ha considerat un aspecte molt important del projecte per tal de poder conèixer i estudiar la matèria que es volia tractar, i per definir el punt de partida del projecte.

Disseny exterior i simulació CFD:

Aquesta part, possiblement ha estat la que ha requerit més temps de dedicació degut al procés d'aprenentatge necessari per utilitzar el software de CFD Star CCM+. Amés de considerar el disseny exterior del vehicle com una part important i de pes dintre de l'estructura del projecte, s'ha intentat que el procés de disseny del cotxe amb el software de CAD CATIA V5 es desenvolupés d'una manera el més semblant possible al procés que es seguiria en l' àmbit professional.

Tant la creació dels dissenys com la posterior simulació CFD s'han anat desenvolupant en paral·lel, ja que una vegada es disposava d'un disseny, aquest es simulava per comprovar-ne la validesa de la solució, i a partir dels resultats obtinguts es redissenyava de nou introduint les millores que es creien

adequades amb l'objectiu de millorar en tot moment el coeficient de resistència aerodinàmic.

Simulació MATLAB-SIMULINK:

La simulació de la plataforma de tracció del BEV, ha ocupat una part important del temps degut a que, juntament amb el disseny i simulació CFD, representen els pilars principals del projecte. En aquest cas amés del procés d'aprenentatge respecte al funcionament del Matlab-Simulink, ha sigut necessari conèixer el funcionament intern d'un BEV per poder recrear-lo en una simulació que vol ser el més propera possible al comportament real d'un vehicle elèctric.

Aquesta simulació amés és la base per a l'obtenció dels resultats finals del projecte, amb la importància que això comporta.

14. PRESSUPOST DEL PROJECTE

14.1. COSTOS D'ENGINYERIA

Càlcul del preu per hora

Per procedir al càlcul del preu hora, se suposarà que el projecte ha estat confeccionat per un enginyer industrial.

En una enginyeria, existeixen els costos directes i indirectes.

14.1.1. COSTOS DIRECTES

Els costos directes contemplen les nòmines del personal.

El salari estàndard d'un enginyer industrial s'estipula en 30.000€ anuals.

El nombre d'hores anuals treballades és de 1.700h.

Per estipular el preu hora, el que es fa és vendre hores (activitat d'empresa).

Per tant, el nombre d'hores, serà:

$$Nº\ d'\ hores\ venudes = 1.700\ hores\ a\ l'any$$

De manera que el preu serà:

$$Preu\ hora\ (costos\ directes) = \frac{Salaris\ anuals}{Nº\ d'hores\ venudes}$$

$$Preu\ hora\ (costos\ directes) = \frac{30.000}{1.700} = 17{,}64\ \cong 18\ €.$$

Amb un benefici per hora treballada del 15%, el preu per hora serà de 20,70€.

14.1.2. COSTOS INDIRECTES

Lloguer del local

El lloguer del local que s'utilitzarà d'oficina i que serà on es desenvoluparà la feina representa un cost mensual de 500€

$$Cost\ anual = 500€ \cdot 12 mesos = 6.000\ €$$

Equips informàtics

Els equips informàtics fan referència al PC, a la impressora, al fax/fotocopiadora, etc.

Es fixa una quantitat màxima de 2.500 €, per a l'adquisició de tots els equips.

La vida útil d'aquests equips es fixa en 5 anys, amb un valor residual (passat els 5 anys) de 300 €.

$$Cost\ anual = \frac{(2.500 - 300)\ €}{5\ anys} = 440\ €$$

Per tant, el cost anual dels equips informàtics serà de 440 €.

Llicències de software

Les llicències de software són imprescindibles per a la utilització dels programes que es fan referència durant el projecte. Aquests programes tenen un cost elevat però són essencials per al desenvolupament d'aquest projecte.

La següent taula mostra el cost anual de les llicències i el cost que suposaria la utilització d'aquests programes en un temps d'utilització suposat del 20% anual.

SOFTWARE	COST ANUAL	COST D'UTILITZACIÓ DEL 20%
Star CCM+	10.000 €	2.000 €
CATIA V5	6.000 €	1.200 €
MATLAB-SIMULINK	3.000 €	600 €
MS OFFICE	500 €	100 €
COST TOTAL		**3.900 €**

Taula 15. Cost de les llicències de software.

Per tant, el cost derivat de les llicències de software serà de 3.900 €.

Material d'oficina

El material d'oficina fa referència al mobiliari (taules, cadires, etc.) i material de papereria (paper, tinta, etc).

Es fixa una quantitat màxima de 1.000 €, per a l'adquisició del mobiliari. La vida útil del mobiliari es fixa en 10 anys, amb un valor residual (passat els 10 anys) de 0 €.

$$Cost\ anual = \frac{(1.000 - 0)\ €}{10\ anys} = 100\ €$$

Per tant, el cost anual del material d'oficina serà de 100 €.

Aquesta quantitat es sobre dimensiona, fixant-la en una quantitat màxima de 300 € anuals, per a despeses de papereria.

Despeses generals

Les despeses generals fan referència al telèfon, Internet, llum, aigua, etc. Es fixa una quantitat màxima de 1.400 €, per a despeses generals.

La suma de tots els costos indirectes, suposa un total de 6.040 € anuals.

Comptant que la feina serà desenvolupada per un únic enginyer, el nombre d'hores anuals treballades és de 1.700 h. El total d'hores anuals, serà de 1.700h.

Llavors, el preu hora, serà:

$$Preu\ hores\ (costos\ indirectes) = \frac{Total\ costos\ indirectes}{N^{\underline{o}}\ d'hores\ venudes}$$

$$Preu\ hores\ (costos\ indirectes) = \frac{12.040}{1.700} = 7{,}08\ \ \cong 7{,}1€$$

En referència als costos indirectes, el preu hora serà de 7,1 €.

El preu hora total, serà:

$$Preu\ hora = Preu\ hora\ (costos\ directes) + \ Preu\ hora\ (costos\ indirectes)$$

$$Preu\ hora = 20{,}70€ + 7{,}1€ = 27{,}8\ €/h$$

Per tant, el preu per hora dels costos d'enginyeria serà de 27,8 €/h.

14.1.3. COSTOS DERIVATS DEL DISSENY

A continuació, es detalla el nombre d'hores emprades en el disseny de la totalitat del projecte:

Etapa preliminar

TASQUES REALITZADES	DURACIÓ
Abast i cerca d'informació	40
Informes preliminars	10
Anàlisis, valoració i elecció de les alternatives més adequades	10
Càlculs mínims	20
Dissenys preliminars	80
HORES TOTALS	**160**

Taula 16. Llistat d'hores dedicades a l'etapa preliminar.

Etapa de desenvolupament

TASQUES REALITZADES	DURACIÓ
Desenvolupament de les solucions adoptades	100
Càlculs específics	20
Desenvolupament de la simulació	80
Obtenció i anàlisis dels resultats	50
HORES TOTALS	**250**

Taula 17. Llistat d'hores dedicades a l'etapa de desenvolupament.

Per tant, el nombre total d'hores serà:

$$Hores\ disseny\ projecte = Hores\ etapa\ preliminar + Hores\ etapa\ desenvolupament.$$

$$Hores\ disseny\ projecte = 160 + 250 = 410h$$

El cost de disseny del projecte serà:

$$Cost\ disseny\ projecte = N^{\underline{o}}\ d'hores\ disseny\ projecte \cdot preu/hora(costos\ d'enginyeria)$$

$$Cost\ disseny\ projecte = 410h \cdot \frac{27{,}8€}{h} = 10.008\ €$$

El cost total de disseny serà de 11.398 €.

14.1.4. COSTOS DERIVATS DE L'ELABORACIÓ DE LA DOCUMENTACIÓ

A continuació, es detalla el nombre d'hores emprades en l'elaboració de la totalitat de la documentació del projecte.

El càlcul d'hores, s'ha fet respecte al total d'hores invertides per part d'un enginyer industrial.

Etapa de desenvolupament

El total d'hores, referent a l'elaboració de la documentació de l'etapa de desenvolupament, ha estat de 70 hores.

Per tant, el cost referent a l'elaboració d ela documentació serà:

$$Cost\ documentació = Nº\ d'hores\ documentació \cdot preu/hora(costos\ d'enginyeria)$$

$$Cost\ documentació = 70h \cdot \frac{27{,}8€}{h} = 1.946\ €$$

El cost total de l'enginyeria, és la suma dels apartats 14.1.3. i 14.1.4.

14.2. COST TOTAL DEL PROJECTE

El cost total de l'enginyeria serà:

$$Cost\ total\ enginyeria = Cost\ total\ disseny + Cost\ documentació$$

$$Cost\ total\ enginyeria = 11.398\ € + 1.946\ € = 13.344\ €$$

Per tant, el cost total de l'enginyeria ascendirà a 13.344 €.

15. CONCLUSIONS DEL PROJECTE I POSSIBLES MILLORES

15.1. CONCLUSIONS GENERALS

Actualment es disposa d'uns vehicles innecessàriament sobre dimensionats i que suposen una despesa d'energia desorbitada, sobretot en trajectes urbans. A més, els vehicles actuals aconsegueixen consums energètics excessivament elevats per a l'ús que se'ls dóna en la majoria dels casos. Tenint clars aquests punts, la principal conclusió que es pot treure és que els vehicles elèctrics actuals, tenen les característiques tècniques i les prestacions necessàries per satisfer les necessitats de mobilitat del 90% dels usuaris de vehicles privats que es mouen en entorns urbans.

La introducció del vehicle elèctric suposaria enormes avantatges en quant a l'estalvi d'energia, (un vehicle elèctric té un consum energètic casi quatre vegades inferior a un vehicle convencional) i a la reducció d'emissions contaminants als nuclis urbans, suposant una important millora en la qualitat de l'aire i directament en la reducció de problemes de salut dels ciutadans.

Per a la consolidació definitiva del vehicle elèctric és necessària una conscienciació social (no tan sols a nivell de la població, sinó també de la indústria de l'automòbil i de l'administració pública) ja que les necessitats de potència que han de tenir els vehicles són molt inferiors a la potència que realment ofereixen. D'aquesta forma, s'ha d'impulsar definitivament el desenvolupament d'una nova generació de vehicles amb uns consums energètics ajustats a les necessitats, i és en aquest punt on el vehicle elèctric ha de jugar un paper important.

Els principals handicaps que presenta el vehicle elèctric són el seu preu inicial i la seva reduïda autonomia. El sobre cost inicial d'adquisició respecte a un vehicle convencional, es compensa en poc més de 5 anys degut al baix cost de funcionament que presenta, tal i com s'ha explicat en aquest projecte. Això fa que a la llarga el vehicle elèctric sigui molt més rendible. De totes maneres aquest sobre cost és degut principalment al cost de les bateries, que és precisament el coll d'ampolla del vehicle elèctric. És en aquest punt on la tecnologia encara ha d'evolucionar amb l'objectiu d'aconseguir bateries amb major densitat d'energia, que permetin augmentar l'autonomia dels vehicles reduint considerablement el seu pes, i reduint també el seu cost. En la mateixa direcció, també cal millorar els sistemes de recàrrega d'energia per disminuir el temps de recàrrega i així indirectament minimitzar la importància de disposar d'una gran autonomia, perquè permetria recarregar les bateries en poc temps.

15.2. CONCLUSIONS DEL PROJECTE

En quant al vehicle desenvolupat, s'ha aconseguit satisfer totes les especificacions de disseny fixades al inici del projecte amb la única excepció de l'autonomia, que és va fixar en 200km i el vehicle objecte d'aquest projecte només disposa d'una autonomia de 154,78km. Aquest punt està condicionat a la limitació imposada en quant al pes del conjunt i a la decisió de muntar una bateria amb una capacitat similar a la dels vehicles elèctrics disponibles actualment al mercat, de manera que això es podria solucionar augmentant la capacitat de la bateria, però no s'ha volgut fer perquè s'ha considerat que les prestacions obtingudes són suficients.

De totes maneres, els resultats obtinguts són en unes condicions de funcionament reals però molt idealitzades. Per tant, probablement en un cicle de conducció diferent al NEDC, que sigui més rigorós en quant al comportament del conductor, aquests resultats seran diferents.

També s'han simulat els efectes que tenen en l'autonomia aspectes com la massa del vehicle, la temperatura ambient, la regeneració d'energia en les frenades i els consums elèctrics dels sistemes auxiliars. La influència de cada factor es mostra en la següent taula:

CONDICIÓ MÉS DESFAVORABLE	INFLUÈNCIA
Temperatura (-10ºC)	- 33,9%
Massa (850kg)	- 3,0%
Regeneració (0%)	- 7,9%
Sistemes auxiliars (3560W)	- 32,7%

Taula 18. Resum de la influència dels factors simulats. (Elaboració pròpia)

El factor més nociu per a l'autonomia del vehicle és sense dubte l'efecte de la temperatura i més concretament del fred. En aquest cas, no s'ha simulat la situació que combini una temperatura molt baixa amb la utilització del sistema de climatització, condició que sense dubte seria la que oferiria pitjor autonomia. El següent factor més influent és el consum elèctric dels sistemes auxiliars. En aquest aspecte és molt important oferir el màxim de comoditats a l'usuari, però amb el menor consum possible per tal de no perjudicar l'autonomia per això, en aquesta aspecte també cal desenvolupar tecnologies més eficients.

Una part important d'aquest projecte ha estat el disseny exterior del vehicle i la posterior simulació CFD per disminuir el Cx i per tant les pèrdues degudes a la resistència aerodinàmica. Finalment, el valor de Cx obtingut ha estat de 0,328, i el millor de tot i que suposa un efecte positiu en la reducció de la resistència aerodinàmica és que s'ha aconseguit reduir l'àrea frontal del vehicle fins a un valor final de 1,86m^2. En conclusió, vist el resultat obtingut, es pot dir que alhora de dissenyar un cotxe i minimitzar les pèrdues aerodinàmiques, és tant important reduir el Cx com intentar reduir l'àrea frontal ja que els resultats obtinguts depenen d'ambdós factors per igual.

Dintre del disseny del vehicle, també s'han intentat desenvolupar sistemes d'extensió de l'autonomia que funcionessin a partir de fonts d'energia renovable, més concretament un sistema de captació eòlica i un de captació solar. Doncs bé, la conclusió que s'ha tret és que aquests dos tipus de fonts d'energia no són aptes per a ser incorporades en un vehicle en moviment per tal de permetre una auto recàrrega. En el cas de l'energia eòlica, un paràmetre important per a obtenir grans quantitats de potència és el diàmetre dels aerogeneradors, i en aquest cas les dimensions es veuen molt limitades ja que han de permetre integrar-se al vehicle, de manera que l'energia obtinguda és escassa.

En el cas de l'energia solar, els resultats són més positius, però no el suficient com per permetre subministrar energia a la bateria. Això passaria perquè la tecnologia de les cel·les fotovoltaiques permeti obtenir components amb un rendiment més elevat que el 8-10% que presenten les plaques flexibles actuals. En canvi, tot i aquest rendiment, aquest sistema pot ser interessant per aplicacions que tinguin a veure amb la refrigeració de l'habitacle i de la bateria durant el funcionament del vehicle o quan aquest es troba estacionat.

15.3. FUTURES MILLORES DEL PROJECTE

Com s'ha comentat amb anterioritat, aquest projecte presenta una solució de vehicle elèctric molt general on no s'han contemplat components específics. El que es pretenia era determinar els requeriments i dimensions que han de complir els components que incorporaria el vehicle. D'aquesta manera el pas següent seria, una vegada es coneixen les característiques que han de tenir els elements de la cadena de tracció, realitzar una selecció de cadascun d'aquests components i realitzar novament la simulació utilitzant els paràmetres reals de cada component. Això, juntament amb la utilització de cicles de conducció més propers a la realitat o fins i tot cicles reals enregistrats amb GPS, permetria obtenir resultats i consums molt fiables i precisos.

Respecte al disseny exterior del vehicle, una vegada definida la forma exterior i les dimensions, seria necessari redissenyar el vehicle modelant cada una de les peces que formen la carrosseria incloent les unions entre peces i tenint en compte també els sistemes de refrigeració i demés sistemes que podrien afectar al resultat final de Cx.

Per últim, i per poder tenir dades fiables més actualitzades que les dades mostrades en aquest projecte referent als hàbits d'ús dels vehicle en zones urbanes, seria interessant realitzar un estudi exhaustiu per poder tenir una millor informació sobre les necessitats reals dels usuaris de vehicles privats.

16. BIBLIOGRAFÍA

16.1. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES:

1. MICHAEL VALENTINE-URBSCHAT, DR.WOLFGANG BERNHART. *Powertrain 2020 - The Future Drives Electric.* s.l. : RolandBerger Strategy Consultants, 2009.
2. MINISTERIO DE FOMENTO. *Estadística del transporte en España.* 2008.
3. MINISTERIO DE FOMENTO. *Anuario Estadístico.* 2010.
4. LOUIS ANTONIO DE LA FUENTE LAYOS. *Passenger Mobility in Europe.* s.l. : EUROSTAT - Transportation Research Board, 2007.
5. GITEL. Grupo de Investigación en Transporte y Logística. [En línia] Universidad de Zaragoza, 2011. (http://gitel.unizar.es/?modulo=cursos/AE)
6. MOUNIR ZERAOULIA. *Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study.* s.l. : IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 55, nº 6., 2006.
7. LIJUN GAO. *Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation.* s.l. : IEE Transactions on components and packaging technologies, vol.25, nº 3., 2002.
8. JAMES LARMINIE, JOHN LOWRY. *Electric Vehicle Technology Explained.* s.l. : John Wiley & Sons Ltd, 2003.
9. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *On the Road in 2035.* s.l. : MIT - Laboratory for Energy and the Environment, 2008.
10. RUSSELL HENSLEY, STEFAN KNUPFER Y DICKON PINNER. *Electrifying cars: How three industries will evolve.* s.l. : MCKINSEY QUARTERLY, 2009.
11. NOTICIASMEDICAS.ES. [En línia] 2011. (http://www.noticiasmedicas.es/medicina/noticias/6922/1/La-contaminacion-causa-en-Espana-16000-muertes-prematuras-/Page1.html.)
12. SYLVIA MEDINA, ALAIN LE TERTRE, MICHAEL SAKLAD. *The Apheis project: Air Pollution and Health—A European.* s.l. : Apheis Collaborative Network, 2009.

16.2. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA:

Bibliografia referent al vehicle elèctric:

- VV.AA. 1997. *El vehiculo eléctrico: Tecnologia, desarrollo y perspectiva.* s.l. : MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 1997.
- VVAA. 1999. *El Vehicle elèctric: situació actual i perspectives.* s.l. : Generalitat de Catalunya. Departament d'Indústria, Comerç i Turisme. Institut Català d'Energia, 1999.

Bibliografia referent a l'energia eòlica:

- David A. Spera. 2009. *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering.* 2009.
- Danish wind industry association [En línia] 2012. (http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wres/index.htm)

Bibliografia referent a l'energia solar:

- ANTONIO LUQUE, STEVEN HEGEDEUS. 2010. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering 2nd Edition.* s.l. : WILEY, 2010.
- TOMAS DIAZ . 2010. *Instalaciones solares fotovoltaicas.* s.l. : McGraw-Hill, 2010.

Bibliografia referent al disseny i l'aerodinàmica de vehicles:

- J. MESEGUER RUIZ, A. SANZ ANDRÉS. 2010. *Aerodinámica Básica 2ª Edición.* s.l. : Garceta, 2010.
- SIMON MCBEATH. 2005. *Aerodinamica del automovil de competición.* s.l. : Grupo editorial CEAC, 2005.
- CARDESIGNONLINE.COM. [En línia] 2012. (http://www.cardesignonline.com/.)
- CarBodyDesign.com – Automotive design and engineering. [En línia] 2012. (http://www.carbodydesign.com/)

Bibliografia referent a consideracions del vehicle elèctric:

- INSTITUTO ESPAñOL DE LA ENERGIA. *Análisis energético y económico del vehículo eléctrico.* Cuadernos de energia nº 26. 2009.
- ENERGIA Y SOCIEDAD. Eficiéncia energética y su potencial. En línia] 2012.

(http://www.energiaysociedad.es/detalle_material_didactico.asp?id=30&secc=8)

- IDAE. *Mapa tecnológico de la movilidad eléctrica. Observatorio Tecnológico de la Energía. 2012.* (http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_Movilidad_Electrica_ACC_c603f868.pdf)

Altres fonts consultades:

- www.motorpasionfuturo.com
- www.km77.com
- http://www.forococheselectricos.com/

17. INDEX DE TAULES

Taula 1. Paràmetres de simulació (Condicions ambientals). (Elaboració pròpia) 67

Taula 2. Paràmetres de simulació (Dinàmica del vehicle). (Elaboració pròpia) .. 67

Taula 3. Paràmetres de simulació (Diferencial). (Elaboració pròpia) 68

Taula 4. Paràmetres de simulació (Motor & Controlador)..... 68

Taula 5. Paràmetres de simulació (Rendiment motor). (Elaboració pròpia)..... 68

Taula 6. Paràmetres de simulació (Bateria). (Elaboració pròpia) 69

Taula 7. Paràmetres de simulació (Model tèrmic de la bateria). (Elaboració pròpia) 69

Taula 8. Paràmetres de simulació (Sistemes auxiliars). (Elaboració pròpia) 70

Taula 9. Autonomia del vehicle en funció de la temperatura ambient. (Elaboració pròpia) 82

Taula 10. Autonomia del vehicle en funció de la seva massa. (Elaboració pròpia) 83

Taula 11. Autonomia del vehicle en funció de la capacitat de regeneració. (Elaboració pròpia) 84

Taula 12. Taula de consum dels sistemes auxiliars. (Elaboració pròpia) 85

Taula 13. Autonomia del vehicle en funció del consum dels sistemes auxiliars. (Elaboració pròpia) 86

Taula 14. Taula resum dels diferents dissenys desenvolupats. (Elaboració pròpia) 128

Taula 15. Cost de les llicències de software. 171

Taula 16. Llistat d'hores dedicades a l'etapa preliminar. 173

Taula 17. Llistat d'hores dedicades a l'etapa de desenvolupament..... 173

Taula 18. Resum de la influència dels factors simulats. (Elaboració pròpia) 176

18. INDEX DE FIGURES

Figura 1. El vehicle elèctric com a alternativa. (Font: www.motorpasionfuturo.com) 4

Figura 2. Velocitats màximes vehicles segment A. (Elaboració pròpia) 7

Figura 3. Dades d'acceleració dels vehicles del segment A. (Elaboració pròpia) . 8

Figura 4. Consums urbans en l/100km dels vehicles del segment A. (Elaboració pròpia) 8

Figura 5. Consums urbans en kWh/100km dels vehicles del segment A. (Elaboració pròpia) 9

Figura 6. Distribució dels vehicles matriculats segons tipus (any 2008). (Font: Ministeri de Foment any 2008) 11

Figura 7. Distribució de velocitats a les carreteres espanyoles els darrers anys. (Font: Ministeri de Foment any 2010) 12

Figura 8. La Jamais Contente, 1899. 16

Figura 9. GM EV-1, 1996. 18

Figura 10. Tipus de vehicles híbrids segons la configuració i disposició dels elements. (Font: http://feelmotor.wordpress.com) 20

Figura 11. Tipus de vehicles elèctrics segons la font d'energia per a la propulsió. (Font: WWF ADENA) 21

Figura 12. Esquema dels components principals d'un VE. (Font: www.motorpasionfuturo.com) 22

Figura 13. Bateria de A123 amb 7 cel·les de liti-fosfat de ferro i els seus controls electrònics. (Font: A123 Systems) 24

Figura 14. Ultracondensadors Maxwell MC. (Font: Maxwell MC) 26

Figura 15. Comparativa de prestacions de bateries. (Font: *Electric Vehicle Technology Explained*) 26

Figura 16. Corba característica de funcionament d'un motor elèctric. (Font: Wikipedia) 28

Figura 17. Avaluació d'alternatives per a la propulsió de vehicles elèctrics. (Font: IEEE) 30

Figura 18. Esquema bàsic d'un inversor. (Font: Wikipedia) 31

Figura 19. REVA 36

Figura 20. Nissan Leaf 37

Figura 21. Smart Electric Drive (ED) 37

Figura 22. Lightning GT. 38

Figura 23. Circuit equivalent de la bateria. (Elaboració pròpia) 42

Figura 24. Determinació del factor de descàrrega α(i). (Font: Valence LiFePo U1-XP) 44

Figura 25. Factor de descàrrega α(i) en funció de la intensitat de descàrrega. (Elaboració pròpia) 45

Figura 26. Determinació del factor de temperatura $\boldsymbol{\beta}$(T). (Font: Valence LiFePo U1-XP) 45

Figura 27. Factor de temperatura $\boldsymbol{\beta}$(T) en funció de la temperatura de descàrrega. (Elaboració pròpia) 46

Figura 28. Factor de caiguda de potencial $\mathbf{\Delta E}$(T) en funció de la temperatura de descàrrega. (Elaboració pròpia) 46

Figura 29. Vista general del model Simulink de la bateria. (Elaboració pròpia) .. 47

Figura 30. Model de validació de la bateria. (Elaboració pròpia) 49

Figura 31. Comparativa de la descàrrega a 0,1C (5,3A) entre corba original i obtinguda. 49

Figura 32. Comparativa de la descàrrega a 0,25C (13,25A) entre corba original i obtinguda. (Elaboració pròpia) 50

Figura 33. Comparativa de la descàrrega a 0,5C (26,5A) entre corba original i obtinguda. (Elaboració pròpia) 50

Figura 34. Comparativa de la descàrrega a 1C (53 A) entre corba original i obtinguda. (Elaboració pròpia) 50

Figura 35. Comparativa de la descàrrega a 2C (106A) entre corba original i obtinguda. (Elaboració pròpia) 51

Figura 36. Tensió de les cel·les a diferents temperatures (Obtinguda). (Elaboració pròpia) 52

Figura 37. Variació de la temperatura de la bateria en funció del coeficient de transferència de calor. (Elaboració pròpia) 52

Figura 38. Resistències que intervenen en la dinàmica del vehicle. (Font: "*Electric Vehicle Technology Explained*") 53

Figura 39. Elements que intervenen en el càlcul d'obstacles. (Font: "*El Vehículo eléctrico : tecnología, desarrollo y perspectivas de futuro*")..... 57

Figura 40. Flux d'energia en un sistema de tracció elèctrica amb frenada regenerativa. (Elaboració pròpia)..... 58

Figura 41. Vista general del model Simulink del vehicle. (Elaboració pròpia)..... 61

Figura 42. Vista de l'interior del bloc Generador de cicle. (Elaboració pròpia).... 62

Figura 43. Vista de l'interior del bloc Dinàmica del vehicle. (Elaboració pròpia) . 63

Figura 44. Vista de l'interior del bloc del Diferencial. (Elaboració pròpia)..... 64

Figura 45. Vista de l'interior del bloc del Motor. (Elaboració pròpia)..... 64

Figura 46. Vista de l'interior del bloc Motor >> Rendiment motor. (Elaboració pròpia) 65

Figura 47. Vista de l'interior del bloc Sistemes auxiliars. (Elaboració pròpia)..... 66

Figura 48. Vista de l'interior del bloc de la bateria. (Elaboració pròpia)..... 66

Figura 49. Corba de potència del motor PowerPhase 75 Motor/Generator del fabricant UQM. (Font: UQM)..... 70

Figura 50. Codi MATLAB del programa per simular l'acceleració del vehicle. (Elaboració pròpia) 75

Figura 51. Corba d'acceleració màxima del vehicle. (Elaboració pròpia) 75

Figura 52. Perfil de velocitat del cicle de conducció NEDC. (Font: Wikipedia) ... 77

Figura 53. Diagrama de flux del funcionament de la simulació del vehicle. (Elaboració pròpia) 79

Figura 54. SOD vs. Distancia recorreguda en cicle NEDC (25ºC). (Elaboració pròpia) 80

Figura 55. SOD vs. Distancia recorreguda en funció de la temperatura ambient. (Elaboració pròpia) 81

Figura 56. SOD vs. Distancia recorreguda en funció de la massa del vehicle. (Elaboració pròpia) 83

Figura 57. SOD vs. Distancia recorreguda en funció de la capacitat de regeneració. (Elaboració pròpia)..... 84

Figura 58. SOD vs. Distancia recorreguda en funció del consum dels sistemes auxiliars. (Elaboració pròpia) 86

Figura 59. Distribució dels components del BEV. Vista lateral. 88

Figura 60. Distribució dels components del BEV. Vista en planta. 88
Figura 61. Distribució dels components del BEV. Vista frontal. 89
Figura 62. Valor d'alguns Cx segons la forma del cos. (Font: Wikipedia) 91
Figura 63. Cx de diferents models d'automòbils actuals. (Font: Wikipedia) 92
Figura 64. Cx dels vehicles analitzats a l'apartat 3.2. (Font: www.km77.com) ... 92
Figura 65. Mòduls utilitzats durant el disseny. 93
Figura 66. Imatges de referència del Nissan Invitation. 94
Figura 67. Esquelet final del vehicle. 95
Figura 68. Imatge zenital de l'esquelet del vehicle. 95
Figura 69. Imatge lateral de l'esquelet del vehicle. 96
Figura 70. Disseny final del vehicle. 96
Figura 71. Vista frontal del disseny final. 97
Figura 72. Vista lateral del disseny final. 97
Figura 73. Vista zenital del disseny final. 97
Figura 74. Vista posterior del disseny final. 98
Figura 75. Volum finit. (Elaboració pròpia) 106
Figura 76. Model del conjunt importat en format IGS. (Elaboració pròpia) 110
Figura 77. Model del vehicle importat en format IGS. (Elaboració pròpia) 110
Figura 78. Aspecte de la malla exterior. (Elaboració pròpia) 112
Figura 79. Aspecte de la malla al voltant del vehicle. (Elaboració pròpia) 112
Figura 80. Gràfica dels residus de la simulació. (Elaboració pròpia) 116
Figura 81. Distribució de pressions (I). (Elaboració pròpia) 117
Figura 82. Distribució de pressions (II). (Elaboració pròpia) 117
Figura 83. Distribució de pressions (III). (Elaboració pròpia) 118
Figura 84. Distribució de velocitats (I). (Elaboració pròpia) 118
Figura 85. Distribució de velocitats (II). (Elaboració pròpia) 119
Figura 86. Distribució de velocitats (III). (Elaboració pròpia) 119
Figura 87. Gràfica del Cx. (Elaboració pròpia) 120

Figura 88. Valor finals del coeficient de resistència aerodinàmica (Cx). (Elaboració pròpia) 120
Figura 89. Exemple de vehicle tipus liftback. 121
Figura 90. Exemple de possibles dissenys de la part frontal. (Font:) 122
Figura 91. Punt d'estancament frontal i línia de traça del capó. 123
Figura 92. Inclinació del parabrises respecte la vertical. 124
Figura 93. Curvatura lateral i reducció de l'amplada final de la part posterior. . 124
Figura 94. Delimitació de les superfícies laterals i posterior. 125
Figura 95. Càmeres instal·lades en substitució dels retrovisors convencionals. 125
Figura 96. Trajectòria dels baixos del vehicle. 126
Figura 97. Inclinació de la part posterior del sostre. 126
Figura 98. Exemple de l'efecte Coanda. (Font:) 127
Figura 99. Petit aleró posterior. 127
Figura 100. PROTO_1. 129
Figura 101. PROTO_1. Vistes. 129
Figura 102. PROTO_2. 130
Figura 103. PROTO_2. Vistes. 130
Figura 104. PROTO_3. 131
Figura 105 PROTO_3. Vistes. 131
Figura 106. PROTO_4. 132
Figura 107. PROTO_4. Vistes. 132
Figura 108. PROTO_4B. 133
Figura 109. PROTO_4B. Vistes. 133
Figura 110. PROTO_4C. 134
Figura 111. PROTO_4C. Vistes. 134
Figura 112. PROTO_4D. 135
Figura 113. Comparativa d'autonomia en funció del Cx. (Elaboració pròpia) ... 135
Figura 114. Vehicle participant en una competició de vehicles eòlics al 2008. . 139

Figura 115. AirRay Car de la companyia americana Earth Sure. 140

Figura 116. Ventile, un vehicle híbrid amb sistema d'absorció d'aire. 140

Figura 117. Imatge del vehicle amb el volum que representa l'aerogenerador i el volum que representa el generador elèctric. 141

Figura 118. Potència elèctrica obtinguda per cicle de conducció NEDC. (Elaboració pròpia) 143

Figura 119. Energia obtinguda per cicle de conducció NEDC. (Elaboració pròpia) 143

Figura 120. Energia elèctrica consumida en un cicle de conducció NEDC. (Elaboració pròpia) 144

Figura 121. Consum energètic en un cicle de conducció NEDC amb una variació de massa de 50kg. (Elaboració pròpia)..... 145

Figura 122. Taula comparativa de les diferents tipologies de cèl·lules fotovoltaiques. (Font: Wikipedia)..... 148

Figura 123. Vehicle solar participant a la competició World Solar Challenge australiana. 149

Figura 124. Toyota PRIUS amb sostre solar. 150

Figura 125. FIAT Phylla. 150

Figura 126. Superfície disponible per a panells solars al sostre. 151

Figura 127. Superfície disponible per a panells solars al capó. 152

Figura 128. Superfície disponible per a panells solars a cada lateral. 152

Figura 129. Consum d'energia final a la UE 27. (Font: EUROSTAT) 156

Figura 130. Consum d'energia final al sector transport i distribució de les emissions a la UE 27 al 2007. (Font: EUROSTAT i Agència Europea del Medi ambient) 157

Figura 131. Fases d'anàlisi de l'eficiència energètica dels vehicles. (Font: WWF ADENA)..... 158

Figura 132. Anàlisi de l'eficiència al "Dipòsit - rodes" (ICE, HEV) i "Planta - rodes" (Part elèctrica del PHEV i BEV). (Font: Cuadernos de energia nº26)..... 159

Figura 133. Consum equivalent d'energia al tram "Dipòsit - roda" per a cada tipus de vehicle al 2035 (Font: MIT) 160

Figura 134. Comparativa dels costos totals per quilòmetre entre un vehicle convencional i un BEV al 2035. (Font:MIT) 163

Figura 135. Comparativa de l'evolució dels costos d'un vehicle elèctric i un vehicle convencional. (Elaboració pròpia) 164

Figura 136. Planificació cronològica del projecte. 168