



Titulació:

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Alumne:

Martí Bach Casas

Enunciat TFG:

Projecte de desenvolupament d'un model de simulació del tren de potència d'un vehicle híbrid

Director/a del TFG :

David González Díez

Convocatòria de lliurament del TFG:

Juny 2020

Document:

Memòria



PROJECTE DE DESENVOLUPAMENT D'UN MODEL DE SIMULACIÓ DEL TREN DE POTÈNCIA D'UN VEHICLE HÍBRID

Grau en Tecnologies Industrials

Autor: Martí Bach Casas

Director del TFG: David González Díez

MEMÒRIA

Juny 2020



Resum

El propòsit d'aquest projecte és el desenvolupament d'un model de simulació d'un vehicle híbrid, el *Toyota Prius*, enfocat en el tren de potència. S'ha emprat el programa MATLAB-Simulink.

En l'estat de l'art del treball, es tracta breument l'actual ús dels vehicles híbrids i les configuracions de tren de potència, així com el Toyota Prius i els components que l'integren. També es presenta el cicle de conducció utilitzat en les simulacions.

A continuació, es detalla el model desenvolupat, tant a nivell de vehicle com de *drivetrain*. En aquest capítol del projecte, s'explica des del funcionament del model de simulació fins al desenvolupament de cada un dels components del tren de potència.

El model s'ha validat comparant els resultats de les simulacions amb els valors de la fitxa tècnica del fabricant. Es presenten els resultats obtinguts en les simulacions, els paràmetres del vehicle i les corbes de parell emprades pels motors.

Amb el model desenvolupat i validat, s'ha efectuat el disseny d'una configuració òptima d'un vehicle híbrid. Es parteix dels paràmetres del Toyota Prius, variant les potències dels motors i les relacions de transmissió.

Finalment, s'exposen el pressupost del projecte, les línies de treball futures i les conclusions.



Jo declaro que,

el treball en aquest Treball Final de Grau és completament propi,

cap part d'aquest Treball Final de Grau és agafat del treball d'altres persones sense el seu consentiment,

totes les referències han estat citades amb claredat,

entenc que la infracció d'aquesta declaració em deixa sotmès a les accions disciplinàries previstes per la *Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH*.

Martí Bach Casas

28/06/2020

Autor

Signatura

Data

Títol del TFG : Projecte de desenvolupament d'un model de simulació del tren de potència d'un vehicle híbrid

Sumari

1.	Introducció	11
1.1	Objectiu del treball.....	11
1.2	Abast	12
1.3	Requeriments del treball	12
1.4	Justificació del treball.....	13
2.	Estat de l'art	14
2.1	Ús actual vehicles híbrids	14
2.2	Configuració del tren de potència.....	15
2.3	Toyota Prius	17
2.4	Components drivetrain	18
2.5	Cicle de conducció WLTP	23
3.	Desenvolupament del model	24
3.1	Funcionament del model	24
3.2	Configuració del tren de potència (<i>Vehicle components</i>).....	27
3.3	Sistema tèrmic	28
3.4	Sistema elèctric	31
3.5	Transmissions.....	34
3.6	Estratègia de control.....	37
3.7	Sistema de control	41
4.	Validació del model – Toyota Prius	46
4.1	Motor de combustió	47
4.2	Mapes d'eficiència motors elèctrics	49
4.3	Resultats simulació cicle de conducció WLTP 3b	50
4.4	Resultats simulació acceleració 0-100 km/h.....	56
4.5	Validació del model.....	60
5.	Disseny d'una configuració òptima per un turisme híbrid.....	61
5.1	Potències del motor de combustió, motor elèctric i generador.....	61
5.2	Relacions de transmissions	63
5.3	Resultats de la configuració òptima.....	65
6.	Resum del pressupost	67
7.	Anàlisi de les implicacions ambientals	68
8.	Línies de treball futures.....	69
9.	Conclusions	70
10.	Bibliografia	71



Annex A	Model del Toyota Prius	73
A.1	Diagrames de blocs dels components del tren de potència	76
Annex B	Codi utilitzat en el model	86
B.1	Definició de paràmetres.....	86
B.2	Matlab function del controlador de velocitat.....	89
B.3	Matlab function del controlador de parell.....	89

Índex de figures

Figura 2.1: Matriculacions de vehicles turismes a la unió europea (2014-2018). Font: [12], elaboració: Pròpia	14
Figura 2.2: Exemple d'una configuració de tren de potència en sèrie. Font: [7]	15
Figura 2.3: Exemple de configuració d'un tren de potència en paral·lel. Font: [7].....	16
Figura 2.4: Toyota Prius. Font: [10]	17
Figura 2.5: Split Parallel Hybrid Electric Vehicle. Font: [13]	17
Figura 2.6: Corba parell versus rpm. Font: [14]	18
Figura 2.7: Esquema d'una cel·la electrolítica. Font: [7]	19
Figura 2.8: Bateria de Ni-MH del Toyota Prius. Font: [10]	19
Figura 2.9: Components elèctrics del tren de potència. Font: [2]	20
Figura 2.10: MG2 i MG1 del Prius. Font: [15].....	21
Figura 2.11: Esquema amb tots els components del Toyota Prius. Font: [7].....	22
Figura 3.1: Model de simulació del HEV. Font: Pròpia	24
Figura 3.2: Bloc de control. Font: Pròpia.....	25
Figura 3.3: Model del tren de potència. Font: Pròpia	27
Figura 3.4: Subsistema del motor alternatiu de combustió interna. Font: Pròpia	28
Figura 3.5: Subsistema del dipòsit de combustible i d'emissions. Font: Pròpia	30
Figura 3.6: Diagrama de blocs del sistema d'engranatges. Font: Pròpia	34
Figura 3.7: Mechanical torque coupling device. Font: [7].....	34
Figura 3.8: Mechanical speed coupling device. Font: [6]	35
Figura 3.9: Subsistema del pneumàtic. Font: Pròpia.....	36
Figura 3.10: Diagrama de blocs de l'estratègia de control. Font: Pròpia	37
Figura 3.11: Força motriu màxima en funció de la velocitat. Font: Pròpia.....	37
Figura 3.12: Funcionament del motor de combustió en règim permanent. Font: [7].....	39
Figura 3.13: Corbes de parell màxim i òptim. Font: Pròpia.....	39
Figura 3.14: Estratègia de control de les revolucions del motor tèrmic. Font: Pròpia	40
Figura 3.15: Bloc de control. Font: Pròpia.....	41
Figura 3.16: Diagrama d'estats lògics. Font: Pròpia	42
Figura 3.17: Engine Speed Controller. Font: Pròpia	43
Figura 3.18: Funció de transferència Wice. Font: Pròpia	44
Figura 3.19: Engine torque controller. Font: Pròpia	44
Figura 3.20: Subsistema de control del motor elèctric MG2. Font: Pròpia.....	45
Figura 4.1: Parell en funció de la velocitat angular i el gas. Font: Pròpia	47
Figura 4.2: Mapa de consums, en funció del parell i velocitat desenvolupats. Font: [5].....	48

Figura 4.3: Mapa d'emissions, en funció del parell i velocitat desenvolupats. Font: [5]	48
Figura 4.4: Mapa d'eficiència del generador. Font: Pròpia	49
Figura 4.5: Mapa d'eficiència del motor elèctric. Font: Pròpia	49
Figura 4.6: Resultats cicle WLTP 3b: velocitats, distància recorreguda i forces. Font: Pròpia ..	50
Figura 4.7: Resultats cicle WLTP 3b: potència, estat de càrrega (SOC) i intensitats. Font: Pròpia	51
Figura 4.8: Resultats cicle WLTP 3b: parells, velocitats angular i potències. Font: Pròpia	52
Figura 4.9: Resultats cicle WLTP 3b: litres de combustible, consum i emissions. Font: Pròpia ..	53
Figura 4.10: Resultats cicle WLTP 3b: Power-Split rati, potència de la bateria. Font: Pròpia.....	54
Figura 4.11: Resultats cicle WLTP 3b: Punts de treball dels motors. Font: Pròpia	55
Figura 4.12: Resultats acceleració 0-100 km/h: velocitats, distància recorreguda i forces. Font: Pròpia	56
Figura 4.13: Resultats acceleració 0-100 km/h: potència, estat de càrrega (SOC) i intensitats. Font: Pròpia	56
Figura 4.14: Resultats acceleració 0-100 km/h: Power-Split rati, potència de la bateria. Font: Pròpia	58
Figura 4.15: Resultats acceleració 0-100 km/h. Punts de treball dels motors. Font: Pròpia	59
Figura 4.16: Valors fitxa tècnica i obtinguts a partir de la simulació. Font: [10], pròpia	60
Figura 5.1: Resultats cicle WLTP 3b configuració desenvolupada: litres de combustible, consum i emissions. Font: Pròpia	65
Figura 5.2: Resultats acceleració 0-100 km/h configuració desenvolupada: velocitats, distància recorreguda i forces. Font: Pròpia.....	65
Figura 5.3: Resultats obtinguts amb la simulació. Font: Pròpia	66
Figura A. 1: Toyota Prius HEV model. Font: Pròpia	73
Figura A. 2: Bloc del control del vehicle. Font: Pròpia	74
Figura A. 3: Bloc d'entorn. Font: Pròpia	74
Figura A. 4: Bloc d'acceleració. Font: Pròpia	74
Figura A. 5: Bloc del tren de potència. Font: Pròpia	75
Figura A. 6: Bloc del motor de combustió interna. Font: Pròpia.....	76
Figura A. 7: Bloc del dipòsit de combustible i emissions. Font: Pròpia.....	76
Figura A. 8: Bloc de la bateria elèctrica. Font: Pròpia	77
Figura A. 9: Bloc del convertidor DC/DC. Font: Pròpia.....	78
Figura A. 10: Bloc de l'inversor del motor M2. Font: Pròpia.....	79
Figura A. 11: Bloc de l'inversor del generador G1. Font: Pròpia	80
Figura A. 12: Bloc del motor elèctric M2. Font: Pròpia	81



Figura A. 13: Bloc del generador elèctric G1. Font: Pròpia	82
Figura A. 14: Bloc del sistema d'engranatges. Font: Pròpia	83
Figura A. 15: Bloc del pneumàtic. Font: Pròpia	83
Figura A. 16: Bloc de control. Font: Pròpia	84
Figura A. 17: Bloc del control lògic. Font: Pròpia	84
Figura A. 18: Bloc del controlador de velocitat. Font: Pròpia	85
Figura A. 19: Bloc del controlador de parell. Font: Pròpia	85
Figura A. 20. Bloc del limitador de parell del motor M2. Font. Pròpia	85



Índex de taules

Taula 1: Categoria del cicle WLTP segons les prestacions del vehicle. Font [3].....	23
Taula 2: Paràmetres del cicle WLTP 3b. Font: [3].....	23
Taula 3: Paràmetres principals del vehicle i dels components del drivetrain. Font: [2] [10][11]46	
Taula 4: Prestacions i especificacions mediambientals del Toyota Prius. Font: [10].....	47
Taula 5: Paràmetres màxims dels motors de la configuració desenvolupada. Font: Pròpia	62
Taula 6: Paràmetres de la transmissió per la configuració desenvolupada. Font: Pròpia	64
Taula 7: Pressupost total del projecte. Font: Pròpia.....	67



1. Introducció

En aquest capítol s'exposa l'objectiu del projecte i la seva justificació, així com l'abast i requeriments que el defineixen.

1.1 Objectiu del treball

Desenvolupar un model de simulació d'un vehicle híbrid en MATLAB-Simulink, amb un tren de potència en paral·lel. Aquest es validarà amb un model de vehicle turisme concret. Finalment, utilitzant el model desenvolupat, es dissenyarà una configuració òptima de drivetrain per a un turisme híbrid.

1.2 Abast

Estudiar l'estat de l'art dels vehicles híbrids: ús i configuracions dels diferents trens de potència, així com els components que n'integren el drivetrain.

Estudi del funcionament matemàtic dels components que formen el tren de potència d'un vehicle híbrid en paral·lel.

Desenvolupar el model de simulació d'un vehicle híbrid en paral·lel. Es partirà d'un model ja existent d'un vehicle elèctric, en què s'hi afegiran els blocs corresponents i s'adaptaran o milloraran la resta de blocs que integren el drivetrain híbrid.

El bloc del motor de combustió interna no simularà el procés de combustió.

Validació del model de simulació MATLAB-Simulink, utilitzant un model concret de vehicle híbrid en paral·lel (Toyota Prius o similar).

Es dissenyarà una configuració òptima del tren de potència d'un vehicle híbrid en paral·lel, tenint en compte l'eficiència del conjunt i les emissions generades. Per realitzar-ho es farà servir el model de simulació desenvolupat.

Obtenció d'unes conclusions finals.

Redacció de la memòria i pressupost del treball.

1.3 Requeriments del treball

- La configuració del tren de potència del model de simulació ha de ser en paral·lel.
- El model s'ha de realitzar amb el programa MATLAB-Simulink.
- El model desenvolupat s'ha de validar.
- La configuració a dissenyar només contemplarà els paràmetres principals de cada component.
- La dedicació estimada del treball final de grau és de 300 hores.
- Els documents a entregar són la memòria, el pressupost i l'autoinforme de qualitat.
- El lliurament definitiu és el 30 de juny.

1.4 Justificació del treball

En els darrers anys, les vendes d'automòbils híbrids han augmentat notablement. Al 2019 les matriculacions dels vehicles híbrids van ser del 6,6% a l'Estat espanyol, i s'espera que arribin al voltant del 40% a l'any 2025. Això implicarà un important desenvolupament tecnològic del sector de l'automoció, amb l'objectiu de produir cotxes de baixes i zero emissions. Actualment, a nivell de vendes d'híbrids, la marca líder del mercat estatal és Toyota; seguida de Hyundai, Audi i Lexus.

El treball està enfocat en els vehicles híbrids en paral·lel o HEV (*Hybrid Electric Vehicle*). Aquests estan formats per un motor de combustió interna i un o més motors elèctrics. Els motors poden girar de forma simultània la transmissió, que impulsa les rodes. La font energètica del motor tèrmic és el combustible; i la dels motors elèctrics, l'energia elèctrica de la bateria. Aquesta es carrega quan els motors elèctrics actuen com a generador, ja sigui amb la frenada regenerativa o quan el motor de combustió produeix més potència de la necessària.

En aquest projecte, es vol desenvolupar un model de simulació que analitzi el comportament mecànic i elèctric d'un vehicle híbrid, així com la seva eficiència; a partir dels paràmetres principals del cotxe i dels components del drivetrain. El model també ha de permetre realitzar l'avant disseny de la configuració d'un tren de potència híbrid en paral·lel.

El model de simulació es realitzarà a partir d'un model completament elèctric del *Nissan LEAF*. A partir dels paràmetres del vehicle, simula el seu comportament, en funció de l'entorn i el cicle de conducció emprat. Els blocs del model de Simulink que formen el tren de potència són la bateria, el convertidor DC-DC, els inversors, els motors elèctrics d'imants permanents, els engranatges i les rodes.

2. Estat de l'art

A continuació, es presenta l'ús actual dels vehicles híbrids i les seves configuracions, a nivell del tren de potència. També s'explica el funcionament del Toyota Prius, vehicle escollit per a realitzar el model de simulació, i els components que l'integren.

2.1 Ús actual vehicles híbrids

Una part important de l'escalfament global i la contaminació de l'aire és deguda als vehicles de combustió interna, de gasolina i dièsel. Per propulsar-se, utilitzen l'energia en forma de calor generada a partir de la reacció de la combustió d'hidrocarburs (HC) i aire. Aquesta reacció també emet altres productes com els òxids de nitrogen, monòxids de carboni, hidrocarburs, òxids de sofre i partícules en suspensió. Les altes temperatures i pressions a la cambra causen la reacció entre el nitrogen present a l'aire i l'oxigen. Les emissions de monòxid de carboni són resultants de la combustió incompleta dels hidrocarburs. Les impureses en el combustible, com ara el sofre, fan que la seva combustió produeixi òxids de sofre (SOx). D'altra banda, les emissions de diòxid de carboni (CO₂), resultant de la combustió d'hidrocarburs, contribueixen a l'escalfament global.

Els vehicles elèctrics i híbrids els aniran substituint a llarg termini. En els darrers anys, han començat a ser significatius en el mercat de l'automoció. Tot i així, encara han de millorar a nivell de prestacions, i ser més econòmics.

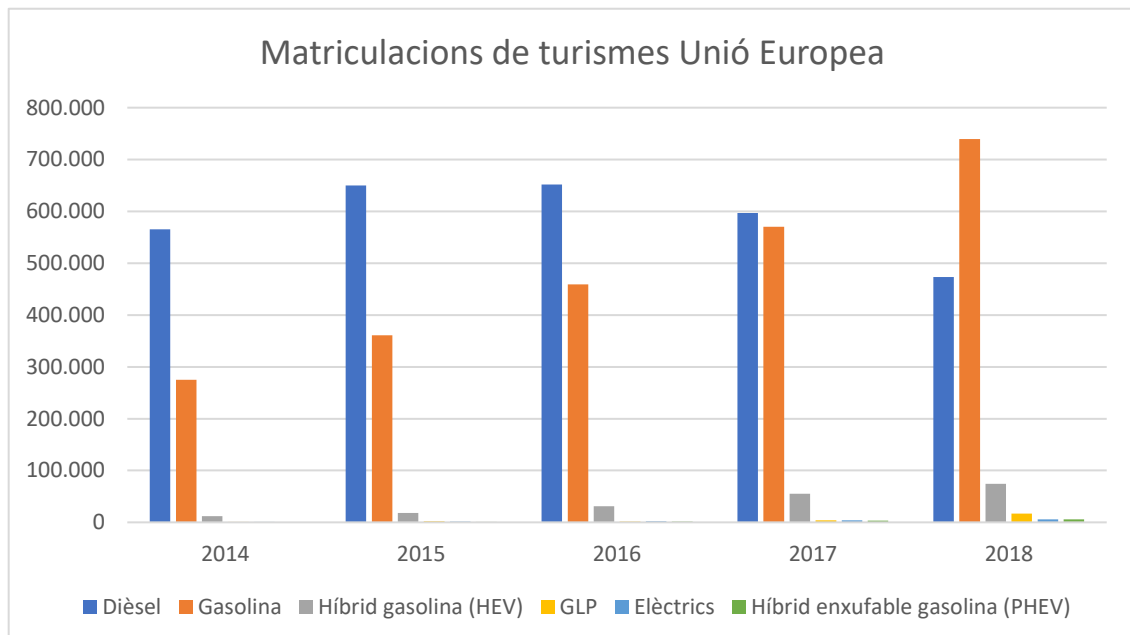


Figura 2.1: Matriculacions de vehicles turismes a la unió europea (2014-2018). Font: [12], elaboració: Pròpia

En aquest gràfic es mostra l'evolució de matriculacions de cotxes turismes a la Unió Europea. En els darrers anys, els automòbils de gasolina han augmentat, en detriment del dièsel, degut a les noves normatives d'emissions, cada cop més restrictives. La tendència de matriculacions de la resta de tipus de vehicles va a l'alça, especialment l'híbrid de gasolina no endollable.

2.2 Configuració del tren de potència

En els vehicles híbrids, l'energia motriu prové del poder calorífic del combustible i del corrent elèctric de la bateria. El tren de potència està format pels components que transformen aquesta energia en moviment. En el mercat automobilístic, existeixen múltiples configuracions, que es poden classificar en sèrie o paral·lel. En els trens de potència en sèrie, l'acoblament de potència és elèctric; i en els trens en paral·lel, és mecànic. També n'hi ha d'altres variants, que són combinacions d'aquests dos.

2.2.1 Sèrie

En el drivetrain sèrie, el motor elèctric està connectat mitjançant una transmissió directa al diferencial. D'altra banda, el motor de combustió interna transmet la potència de forma indirecta. El seu eix està connectat a un generador, que transforma l'energia mecànica del motor en elèctrica. En funció de l'estat de la bateria i la demanda de potència requerida, aquesta es distribueix entre la bateria i el motor elèctric. Entre la bateria i els controladors del motor i generador, hi ha el convertidor DC/DC, per donar un voltatge i intensitat constant. El motor tèrmic treballa en el seu règim més òptim, a nivell de revolucions i de parell.

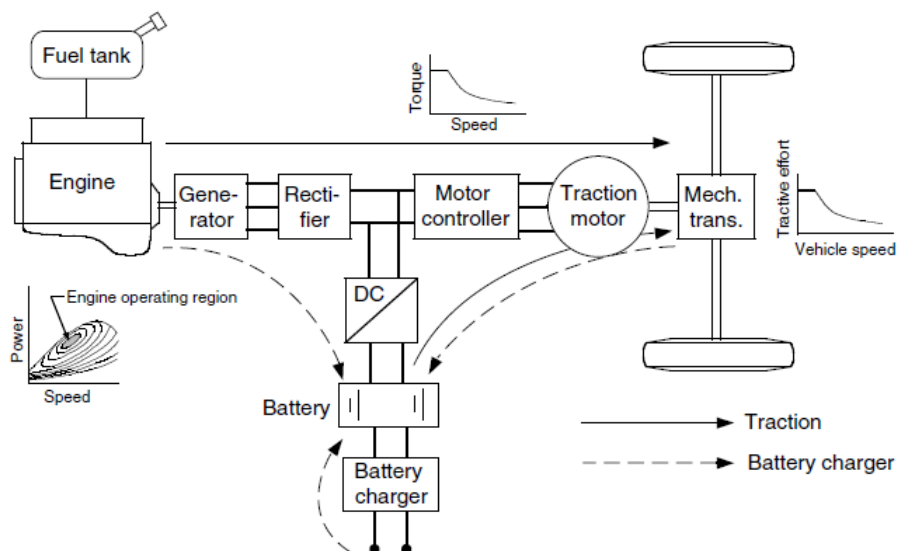


FIGURE 5.4
Configuration of a series hybrid electric drive train

Figura 2.2: Exemple d'una configuració de tren de potència en sèrie. Font: [7]

Els principals avantatges d'aquest tipus de configuracions són que gairebé sempre el motor de combustió pot treballar en la regió de màxima eficiència, no es necessita una transmissió múltiple i l'estratègia de control del tren de potència és més senzilla, en comparació als paral·lels. També presenten diversos desavantatges. L'energia procedent del combustible es transforma dues vegades, fet que disminueix l'eficiència del conjunt; necessiten un transformador, que n'incrementa el pes i cost; i el motor elèctric, encarregat de la tracció del cotxe, ha d'estar dimensionat amb els requeriments màxims.

2.2.2 Paral·lel

En el drivetrain en paral·lel, l'acoblament entre el motor de combustió i l'elèctric es mecànic. Les opcions de transmissions mecàniques són molt diverses, atès que es poden situar abans i/o després de l'acoblament. Normalment, en aquest tipus d'automòbils, la potència del motor elèctric és més petita, ja que reforça al motor tèrmic. La bateria es carrega amb la frenada regenerativa; o bé quan el motor tèrmic transmet més potència de la necessària, en què el motor elèctric actua com generador, recuperant la potència sobrant.

L'acoblament mecànic pot ser per parell o per velocitat. També hi ha variants que combinen aquests dos models, ja sigui a la vegada o alternant-los. En l'acoblament per parell (*Torque Coupling*), la suma dels moments multiplicats per una constant, dona el parell total que es transmet al diferencial. És a dir, les velocitats angulars de cada motor són directament proporcionals a la velocitat del vehicle. D'aquesta forma, existeix un grau de llibertat en el parell que entrega cada motor. D'altra banda, en l'acoblament per velocitats (*Speed Coupling*), el parell que s'entrega a les rodes és proporcional a cada motor. La velocitat angular transmesa al diferencial és la suma de les velocitats angulars de cada motor multiplicades per la seva constant corresponent.

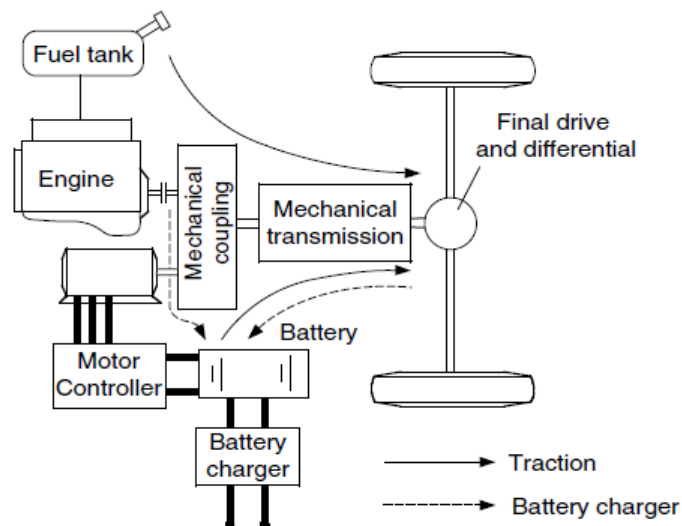


FIGURE 5.5
Configuration of a parallel hybrid electric drive train

Figura 2.3: Exemple de configuració d'un tren de potència en paral·lel. Font: [7]

Els principals avantatges de la configuració en paral·lel són que no és necessari un generador, el motor elèctric és més petit, i no és necessària una multi conversió d'energia. Per contra, l'acoblament mecànic fa que l'estratègia del control del tren de potència sigui més complexa, perquè la tracció transmesa a les rodes pot ser simultània.

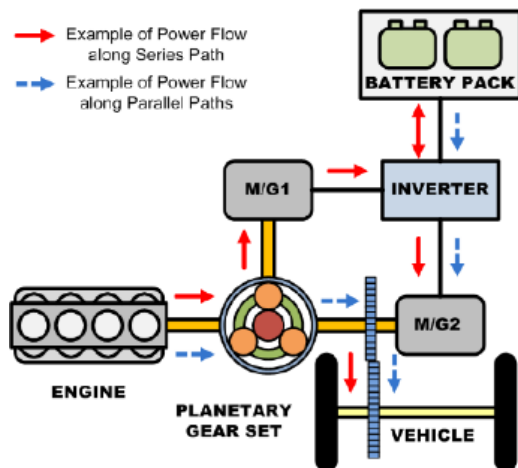
2.3 Toyota Prius

En aquest projecte, s'ha desenvolupat un model de simulació d'un vehicle híbrid, el Toyota Prius, que és un híbrid de gasolina no endollable. És el turisme híbrid més venut i és un model de referència.



Figura 2.4: Toyota Prius. Font: [10]

L'arquitectura del tren de potència és de tipus *Split-Parallel Hybrid Electric Vehicle (SPHEV)*[1]. Es tracta d'una variant del paral·lel, que combina algunes característiques dels sèrie. Aquesta configuració és la més eficient, atès que té els avantatges dels sèrie i paral·lel. El gran desavantatge que presenta és la complexitat en l'estratègia de control.



El drivetrain està constituït per un motor de combustió interna, d'encesa per explosió (ICE); i dos motors/generadors elèctrics: Motor de tracció principal (M2) i generador (G1). La tracció del vehicle és realitzada pels motor tèrmic i elèctric principal. La transmissió de potència a les rodes es realitza en paral·lel.

La potència mecànica que desenvolupa el motor de combustió interna segueix dos camins. La major part, es transmet al diferencial, per propulsar el cotxe. La restant va cap al generador, que carrega la bateria o transmet potència al motor elèctric de tracció.

Figura 2.5: Split Parallel Hybrid Electric Vehicle. Font: [13]

El motor tèrmic i el generador estan connectats mitjançant un sistema d'engranatges planetari. El generador actua com una E-CVT(Transmissió contínua variable electrònicament) entre la velocitat de l'engranatge de sortida (corona), proporcional a la velocitat del vehicle; i la velocitat del motor de combustió. Variant la velocitat de gir del generador, es canvia la relació de velocitats motor-corona. El generador també actua com el motor d'arrancada de l'ICE. Quan el generador està en funcionament, una part de la potència que produeix el motor de combustió va cap al generador per carregar la bateria.

La corona del planetari i el motor de tracció elèctric M2, engranen l'eix que està connectat a la transmissió del vehicle. En aquest cas, hi ha un grau de llibertat entre el parell que entrega la corona i el motor.

Cada motor és controlat per un inversor de forma independent. Entre la bateria i els inversors hi ha un convertidor DC/DC, per estabilitzar els voltatges.

2.4 Components drivetrain

2.4.1 Motor tèrmic de combustió interna

En els vehicles híbrids, de forma general, la font primària d'energia correspon al motor de combustió interna, que transforma l'energia termoquímica del combustible en energia mecànica. El motor del Prius és d'encesa per explosió i utilitza gasolina com a combustible. Aquest tipus de motor és el més emprat en els HEV.

La transformació energètica es produeix a l'interior dels cilindres del motor. Degut a la combustió de la mescla d'aire i gasolina, s'impulsen els pistons, que transmeten el moviment al cigonyal, a través del sistema biela-manovella. Aquest sistema transforma el moviment rectilini del pistó en rotatiu.

El cicle termodinàmic més emprat en els motors d'encesa per explosió és l'*Otto*, de quatre temps. En el cas del *Prius*, com en d'altres vehicles híbrids, s'utilitza el cicle *Atkinson*, també de quatre temps. Els motors que treballen amb aquest cicle, aconsegueixen relacions de compressió més altes respecte els del cicle Otto, cosa que els permet obtenir una major eficiència. Per contra, la potència que obtenen és lleugerament menor.

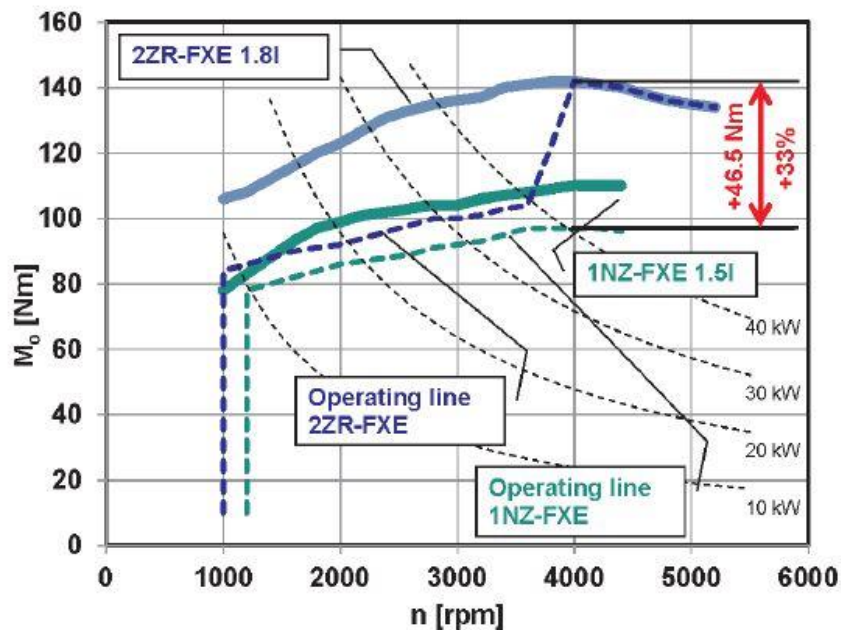


Figura 2.6: Corba parell versus rpm. Font: [14]

En aquesta gràfica es poden observar les corbes de parell del motor actual del Prius, anomenat 2ZR-FXE, i les de la versió anterior (1NZ-FXE). Estan representades en funció del règim de velocitat angular del motor. Les corbes contínues delimiten el moment màxim que pot desenvolupar. El parell màxim actual, de 142 Nm, s'obté al voltant d'unes 3600 rpm; i la potència màxima, de 72 kW, a unes 5200 rpm.

Les corbes discontinües corresponen a les línies de parell òptimes. També s'anomenen d'operació, atès que sempre que és possible, el motor hi treballa, perquè s'hi obté el rendiment màxim.

2.4.2 Bateria elèctrica

Està formada per diverses cèl·lules electrolítiques agrupades conjuntament. Cadascuna està constituïda per un elèctrode positiu i negatiu, immersos en un líquid, anomenat electròlit. Quan la bateria s'està carregant, els ions de l'elèctrode positiu (càtode) flueixen cap a l'elèctrode negatiu (ànode), a través de l'electròlit. Els electrons també van cap a l'elèctrode positiu, però a través del circuit extern. En el procés de descàrrega de les cèl·lules el procés és a l'inrevés, els ions i electrons flueixen de l'ànode al càtode.

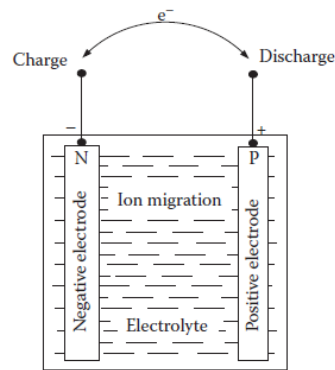


Figura 2.7: Esquema d'una cel·la electrolítica. Font: [7]

A través de les reaccions electroquímiques d'oxidació o reducció, es carrega o cedeix electricitat. Les més utilitzades per vehicles híbrids són les níquel-Cadmi (Ni-Cd), níquel-hidruir metàl·lic (Ni-MH) i ió-liti (Li-Io). En el Prius, la bateria és de tipus Ni-MH. Aquesta es mostra a continuació.



Figura 2.8: Bateria de Ni-MH del Toyota Prius. Font: [10]

2.4.3 Electrònica de potència: Convertidor i inversors

La part elèctrica del tren de potència està configurada pel motor i generador, el convertidor (DC/DC), els inversors (DC/AC) i un controlador electrònic.

En l'esquema següent es mostren tots els components elèctrics que constitueixen el drivetrain.

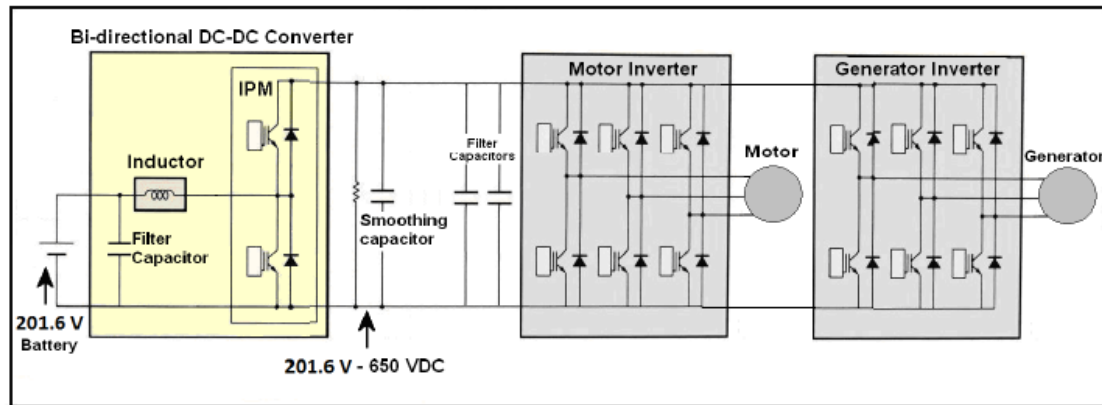


Figura 2.9: Components elèctrics del tren de potència. Font: [2]

Els motors reben el voltatge i intensitat dels seus inversors corresponents, que estan controlats electrònicament amb el controlador. Els inversors transformen el corrent continu provinent del convertidor en alternu. El voltatge amb què són alimentats tots dos és comú, atès que estan connectats en paral·lel. El convertidor de corrent continu és de tipus *boost*. Augmenta el voltatge provinent de la bateria a un valor constant. És necessari per estabilitzar el voltatge d'entrada dels inversors, perquè el voltatge que entrega la bateria pot variar en funció de l'estat de càrrega de la bateria (SOC) o de la seva temperatura.

2.4.4 Motor i generador elèctrics

Els motors elèctrics, transformen l'energia elèctrica en mecànica. Estan formats per l'estator i el rotor. El moviment és produït per la interacció de camps magnètics, creats per bobinats elèctrics o per imants permanents. Els més utilitzats per a vehicles elèctrics o híbrids, són els d'imants permanents (PMSM o BLDC), d'inducció i de reluctància. Aquests motors també poden actuar a la inversa, és a dir, com a generadors.

El Toyota Prius està constituït per dues màquines elèctriques, que poden treballar tant com a motor com a generador. Són síncrons d'imants permanents.

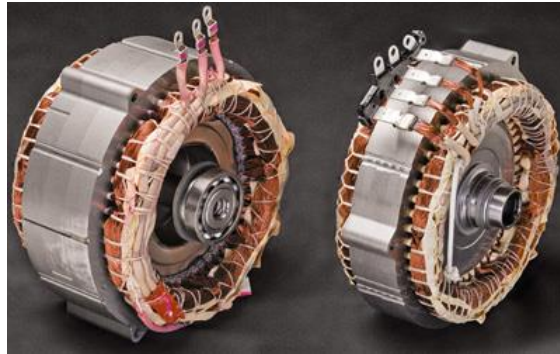


Figura 2.10: MG2 i MG1 del Prius. Font: [15]

En aquests tipus de motors, el camp magnètic principal és creat pels imants permanents del rotor. L'estator té un bobinat trifàsic, que és alimentat amb un corrent altern trifàsic. Els dos camps magnètics giren de forma síncrona. Al no tenir escombretes, la seva estratègia de control és més complexa, respecte altres tipus de motors. Aquesta es pot realitzar amb sensors o sense. L'inversor ha de proporcionar les intensitats corresponents a cada fase de l'estator per generar el seu camp magnètic, mantenint-lo a 90 graus del camp del rotor.

A nivell d'avantatges presenta una alta eficiència, parell alt (sense ondulacions), soroll baix, és el que pot oferir un rang de velocitats més elevat, i no necessita un corrent d'excitació. Per contra té cost elevat degut als imants permanents, contra forces radials, el seu control és complex (tres fases sinusoidals), i capacitat limitada pels imants (s'han d'evitar les altes temperatures perquè no es desmagnetitzin).

El PMSM és el que té millors propietats, ofereix la màxima eficiència en un rang de velocitats definit, en comparació a la resta de motors. Tot i que necessiti un controlador i la seva estratègia de control sigui més complexa, això no suposa un gran inconvenient, atès que l'electrònica de control és relativament barata. Per aquests motius, és recomanable pels vehicles híbrids, ja que es busca maximitzar l'eficiència, per l'estalvi de combustible; i per la seva densitat de potència.

2.4.5 Sistema de transmissió

Està format per diversos engranatges i el diferencial. Els engranatges els podem agrupar en el sistema planetari (*Planetary gear unit* o *Speed Coupling*), l'acoblament de parell (*Torque Coupling*) i la transmissió final.

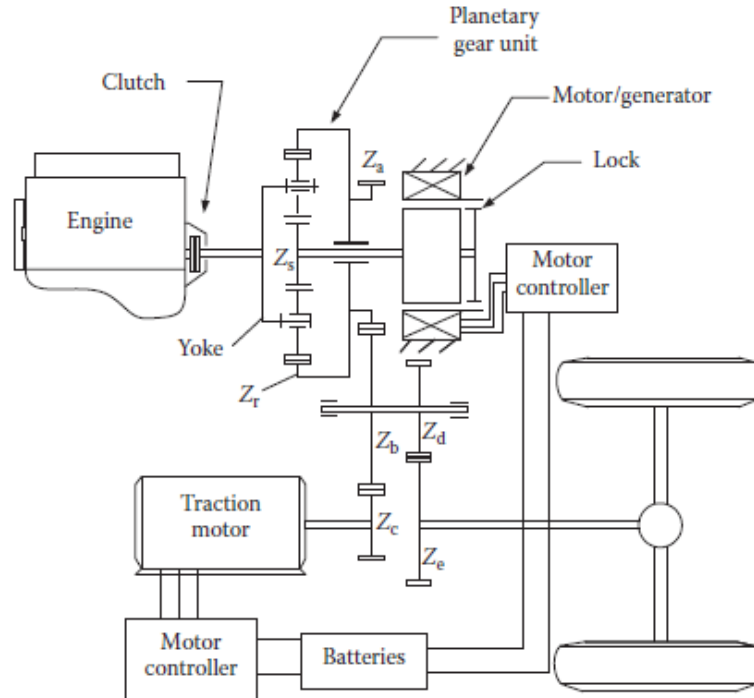


Figura 2.11: Esquema amb tots els components del Toyota Prius. Font: [7]

L'engranatge planetari connecta mecànicament el motor de combustió, el generador i l'eix principal. Entre aquests tres components hi ha un grau de llibertat. El motor de combustió està connectat al porta-planetes (*Yoke*), i el generador al Sol (engranatge Z_s). La corona del planetari té dents interiors (Engranatge Z_r) i exteriors (engranatge Z_a). L'engranatge de sortida o Z_a , engrana Z_b a l'eix principal.

En l'acoblament de parell (eix entre els engranatges Z_b - Z_d) es sumen els moments provinents del sistema planetari i del motor elèctric.

Finalment, hi ha una relació de transmissió final (engranatges Z_d , Z_e) entre l'eix de l'acoblament de parell i el diferencial del vehicle.

2.5 Cicle de conducció WLTP

Els cicles de conducció permeten comparar els consums i emissions de diferents vehicles sota les mateixes condicions. Un cicle representa un perfil de velocitats en funció del temps. En aquest projecte, les simulacions s'han realitzades amb el cicle WLTP, atès que és el vigent a nivell europeu. Les dades de consums i emissions publicades pels fabricants de vehicles turismes, es fan amb un test de laboratori que segueix aquest cicle.

El cicle WLTP (*Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure*) va substituir a l'any 2017 el cicle NEDC (*New European Driving Cycle*), representant millor la conducció. Hi ha quatre classes del cicle, en funció del coeficient potència-massa i de la velocitat màxima.

Categoria	PMR [W/kg]	V _{MAX} [km/h]
Class 3b	PMR > 34	V _{MAX} ≥ 120
Class 3a	PMR > 34	V _{MAX} ≤ 120
Class 2	34 ≥ PMR ≥ 22	-
Class 1	PMR ≤ 22	-

Taula 1: Categoria del cicle WLTP segons les prestacions del vehicle. Font [3]

Al Prius li correspon la classe 3b. Està constituïda en quatre fases amb diferents velocitats mitjanes (*Low*, *Medium*, *High* i *Extra-High*). Cada part conté acceleracions, parades i frenades. La seva durada total és de 30 minuts.

Fase	t [s]	t _{STOP} [s]	D [m]	V _{MAX} [km/h]	V _{MITJA} (sense parades) [km/h]	V _{MITJA} (amb parades) [km/h]	a _{MIN} [m/s ²]	a _{MAX} [m/s ²]
Low	589	156	3095	56,5	25,7	18,9	-1,47	1,47
Medium	433	48	4756	76,6	44,5	39,5	-1,49	1,57
High	455	31	7162	97,4	60,8	56,7	-1,49	1,58
Extra-High	323	7	8254	131,3	94,0	92,0	-1,21	1,03
Total	1800	242	23266					

Taula 2: Paràmetres del cicle WLTP 3b. Font: [3]

3. Desenvolupament del model

En aquest capítol, s'explicarà el desenvolupament del model de simulació, així com el seu funcionament. El model està realitzat amb el programa MATLAB Simulink. Inicialment, es va partir d'un model de vehicle completament elèctric, del qual s'han adaptat i modificat els blocs corresponents.

El model està constituït per quatre grans blocs: control del vehicle, entorn, components del vehicle i bloc d'acceleració. Aquest projecte s'ha centrat en el desenvolupament del tercer, que és el tren de potència del vehicle. Cada component del tren de potència està representat per un subsistema o bloc. En l'annex de la memòria, es troben tots els diagrames de blocs que formen el model desenvolupat.

3.1 Funcionament del model

El model simula el comportament del cotxe, ja sigui per una consigna de velocitat constant o un perfil de velocitats determinat. En aquest apartat, es detallen els grans blocs que formen el model del vehicle híbrid.

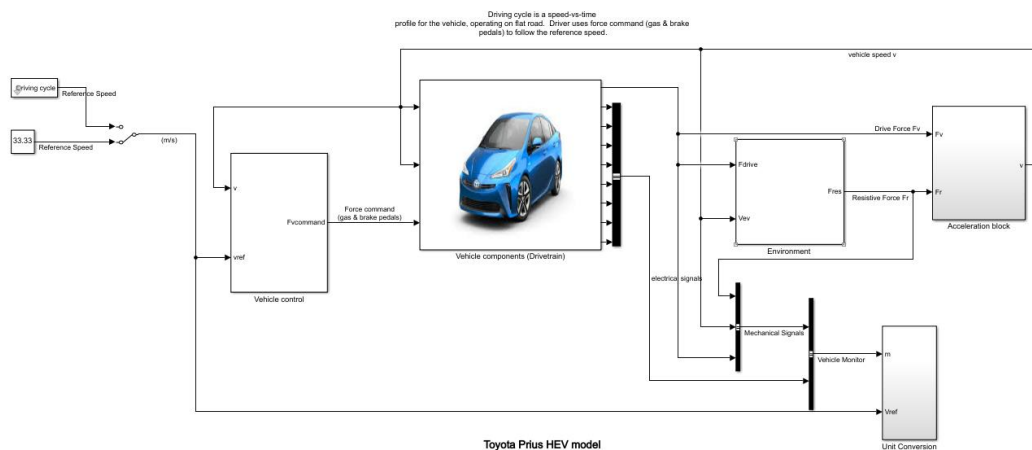


Figura 3.1: Model de simulació del HEV. Font: Pròpia

En el primer bloc, control del vehicle, es simula el pedal del gas. Com a variables d'entrada té la velocitat del vehicle i la seva consigna. En funció d'aquestes dues, calcula la consigna de força de tracció necessària perquè el vehicle assoleixi la velocitat desitjada.

Seguidament, hi ha el bloc del tren de potència. Les seves variables d'entrada són la velocitat i la consigna de força. A partir dels diferents components que l'integren, s'obté la força de tracció del vehicle. A més, es generen els resultats de la simulació, tant dels components elèctrics com mecànics.

La força de tracció, juntament amb la velocitat, són les variables d'entrada del bloc de l'entorn. Aquest modelitza la carretera. La simulació es pot realitzar amb una inclinació constant o a través d'un perfil altimètric. En funció de les variables i paràmetres que el constitueixen, el bloc calcula la força resistiva.

Finalment, en l'últim subsistema o bloc, es calcula la velocitat (instantània) per unes forces de tracció i resistiva donades, seguint la segona Llei de Newton.

3.1.1 Bloc de control del vehicle

En la figura següent, es mostra el controlador del vehicle. La seva funció és comparar la velocitat actual del vehicle amb la velocitat de referència o consigna. La sortida del diagrama de blocs és la consigna de força necessària per assolir la velocitat desitjada, que pot ser positiva o negativa. Està limitada per la màxima força de tracció que pot desenvolupar el cotxe. El bloc està constituït per un controlador proporcional i integral.

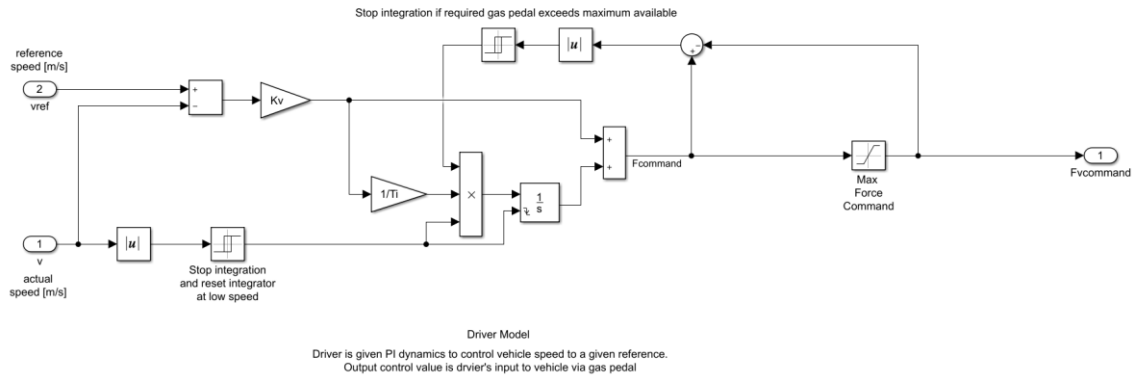


Figura 3.2: Bloc de control. Font: Pròpia

3.1.2 Bloc environment

Com s'ha mencionat, les variables d'entrada són la força de tracció i la velocitat. La força resistiva depèn bàsicament de la velocitat. Està constituïda per la suma de tres forces: la resistència de l'aire, resistència a la rodadura i la gravetat.

$$F_R = F_{Air_resistance} + F_{Roll_resistance} + F_{Gravity} \quad (3.1)$$

Les forces de resistència al moviment venen definides per les fórmules següents:

$$F_{Air_resistance} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot C_d \cdot A_v \cdot V^2 \quad (3.2)$$

$$F_{Roll_resistance} = \pm 1 \cdot C_r \cdot M_v \cdot g \quad (3.3)$$

$$F_{Gravity} = M_v \cdot g \cdot \sin \theta \quad (3.4)$$

Quan el vehicle parteix d'un estat en repòs, ha de vèncer la força següent:

$$F_{stopped} = \pm \cdot C_r \cdot M_v \cdot g \quad (3.5)$$

3.1.3 Bloc d'acceleració

S'hi obté la velocitat instantània de l'automòbil, a partir de la segona llei de Newton. En primer lloc, es calcula l'acceleració, en funció de les forces de tracció i resistència; i la massa del vehicle:

$$a = \frac{F_v - F_r}{M_v} \quad (3.6)$$

Mitjançant el bloc de Simulink *Integrator*, s'integra i s'obté la velocitat.

3.2 Configuració del tren de potència (*Vehicle components*)

En el model de simulació, el tren de potència està format per diferents blocs, que representen els components que l'integren. S'han classificat en quatre conjunts.

- Sistema tèrmic
- Sistema elèctric
- Transmissions
- Sistema de control

El sistema tèrmic, està format pel model del motor de combustió interna, i el bloc de dipòsit de combustible i emissions. La part elèctrica, està constituïda pels motors generadors M2 i G1, els seus respectius inversors, el convertidor i la bateria. Les transmissions, estan formades pel sistema d'engranatges i el bloc del pneumàtic. El sistema de control, està format per un sol bloc, constituït per diversos subsistemes.

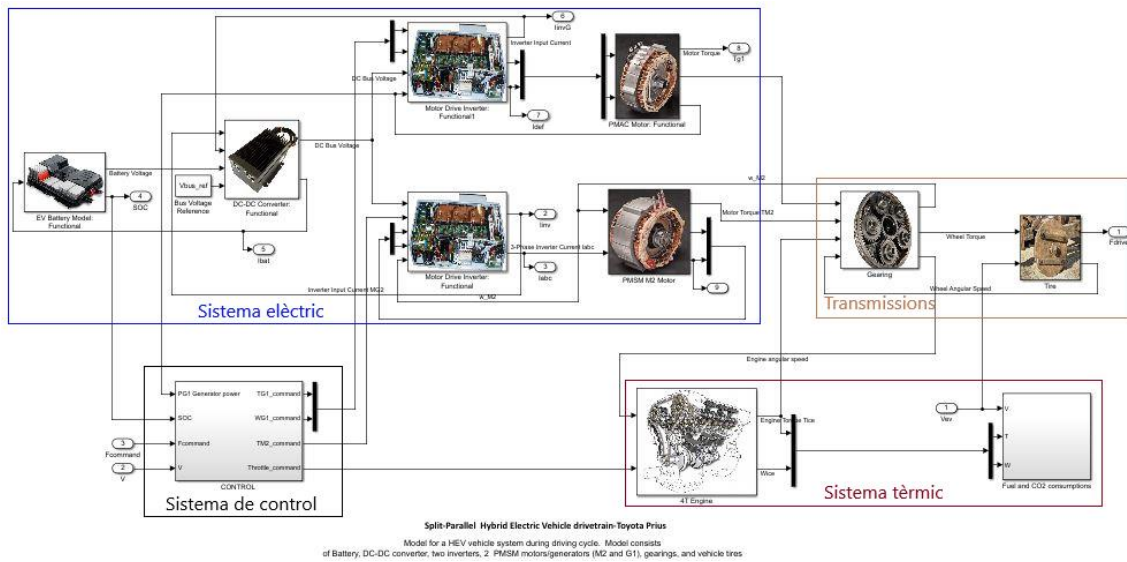


Figura 3.3: Model del tren de potència. Font: Pròpia

3.3 Sistema tèrmic

3.3.1 Model del motor de combustió interna

Per representar el parell desenvolupat pel motor, s'ha emprat una taula, en funció de dues variables, la velocitat de gir i el gas (*throttle*). La primera variable, ve donada pel bloc d'engrenatges; i la segona, pel bloc de control. El gas representa el percentatge de parell màxim que pot oferir el motor, per un règim de velocitat determinat.

La corba de parell màxim s'ha obtingut mitjançant la fórmula següent [4], que varia en funció de la velocitat angular del motor (expressada en [rad/s]) i dels paràmetres T_1, T_2, T_3 :

$$T_{ICEmax}(\omega_{ICE}) = T_1 + T_2 \cdot \omega_{ICE} + T_3 \cdot \omega_{ICE}^2 \quad (3.7)$$

$$T_1 = 0,87 \cdot \frac{P_{max}}{\omega_{ICEmax}} \quad (3.8)$$

$$T_2 = 1,13 \cdot \frac{P_{max}}{\omega_{ICEmax}^2} \quad (3.9)$$

$$T_3 = -\frac{P_{max}}{\omega_{ICEmax}^3} \quad (3.10)$$

Afegint el gas a l'equació, s'obté una funció de dues variables. La variable s és el percentatge de gas en tant per un.

$$T_{ICE}(\omega_{ICE}, gas) = s \cdot T_{ICEmax}(\omega_{ICE}) + T_0 \cdot (1 - s) \quad (3.11)$$

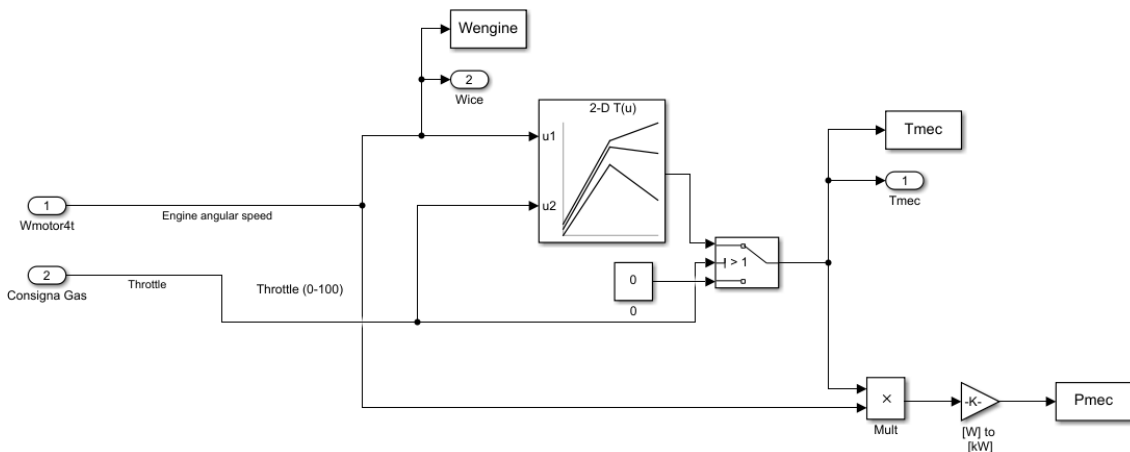


Figura 3.4: Subsistema del motor alternatiu de combustió interna. Font: Pròpia

La potència mecànica desenvolupada és el producte del parell resultant i la velocitat angular.

$$P_{ICE} = T_{ICE} \cdot \omega_{ICE} \quad (3.12)$$

3.3.2 Dipòsit de combustible i emissions

Per representar tant el consum de combustible, com les emissions de CO₂, s'han emprat taules del bloc *Mapped SI Engine* de la llibreria *Powertrain Blockset* de *Simulink*, definint els paràmetres del motor de combustió del model. [5]

En funció del parell i velocitat de l'ICE, les taules donen el consum i emissions en [kg/s]. Integrant aquests valors, a través del bloc integrador, que suma els valors instantanis, s'obtenen el total de consum i emissions de la simulació corresponent, en kg.

El consum de combustible es passa de kilograms a litres, a través de la densitat del combustible en qüestió $\rho_{gasolina}$:

$$Consum [l] = Consum [kg] \cdot \frac{\rho_{gasolina}}{1000} \quad (3.13)$$

Restant els litres consumits a la capacitat inicial del dipòsit, es calculen els litres restants de combustible. El valor de la capacitat inicial és un paràmetre del model de simulació. En el cas en què el dipòsit es quedi sense combustible, s'atura la simulació.

$$Capacitat [l] = Capacitat_{INICIAL} [l] - Consum [l] \quad (3.14)$$

D'altra banda, també s'integra la velocitat instantània del vehicle, per obtenir, la distància recorreguda (en metres). Amb les expressions següents es calculen les mitjanes de consum i d'emissions respectivament.

$$Consum[l/100km] = 100 \frac{Consum[l]}{distància[m]} \quad (3.15)$$

$$Emissions[l/ km] = \frac{Consum[l]}{distància[m]} \quad (3.16)$$

La imatge correspon al model de dipòsit desenvolupat al programa Simulink.

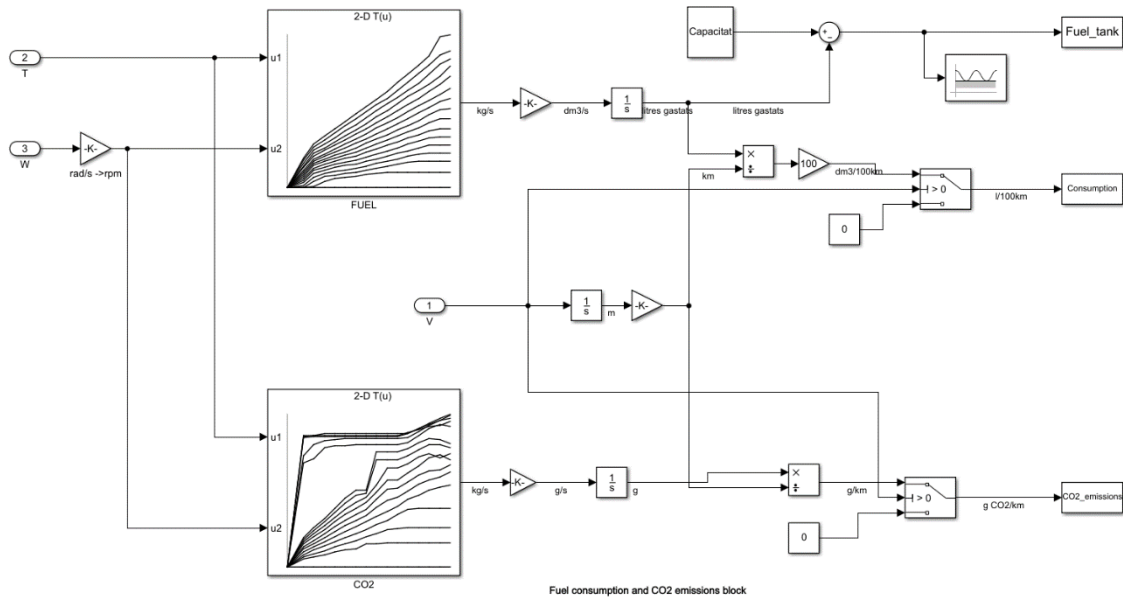


Figura 3.5: Subsistema del dipòsit de combustible i d'emissions. Font: Pròpia

3.4 Sistema elèctric

Com s'ha mencionat anteriorment, aquest està constituït per dues màquines elèctriques, dos inversors, un convertidor i una bateria.

3.4.1 Subsistema de la bateria elèctrica

La bateria del cotxe, cedeix o absorbeix potència, per assolir les demandes de parell corresponents o carregar-se. Entrega un voltatge constant determinat V_{bat} al convertidor DC/DC. El voltatge està definit com a paràmetre del model de simulació. La intensitat de sortida, I_{bat} , també correspon al corrent d'entrada del convertidor DC/DC. Aquesta depèn del funcionament de les màquines elèctriques, M2 i G1. Si és positiva, la bateria s'està descarregant. Per tant, l'estat de càrrega (SOC) disminueix. Per contra, si la intensitat és negativa, el SOC augmenta.

La potència instantània de la bateria, s'obté amb el producte del voltatge i la intensitat.

$$P_{bat} = -V_{bat} \cdot I_{bat} \quad (3.17)$$

L'equació següent representa el funcionament del subsistema. El SOC s'expressa en tant per cent. L'estat de càrrega inicial SOC_0 , i la capacitat de la bateria (en [Joules]) són paràmetres del model.

$$SOC = SOC_0 + \int_0^t 100 \frac{P_{bat}}{Capacitat} dt \quad (3.18)$$

En el model, té com a variable d'entrada la intensitat, i com a variables de sortida, el voltatge i l'estat de càrrega. Si el SOC arriba a cent o zero, la simulació s'atura.

3.4.2 Subsistema del convertidor de corrent contínua DC/DC

Es tracta d'un convertidor de tipus boost. Augmenta el voltatge de sortida respecte el cedit per la bateria elèctrica. El paràmetre V_{ref} correspon al voltatge que es vol obtenir, que en aquest cas és constant.

Les entrades del subsistema són I_{out} , V_{bat} i V_{ref} ; i les variables de sortida V_{bus} i I_{bat} . El corrent I_{out} i el voltatge V_{bus} corresponen a la sortida del convertidor. El voltatge dels inversors és V_{bus} en ambdós casos, atès que estan connectats en paral·lel. Per tant, la intensitat entregada o rebuda pel convertidor és la suma dels corrents d'entrada dels dos inversors.

$$I_{bat} = \frac{I_{out}(+)}{\eta_{boost}(1 - D)} \quad (3.19)$$

$$I_{bat} = \frac{\eta_{boost} I_{out}(+)}{(1 - D)} \quad (3.20)$$

El *duty cycle* D és la fracció d'un període que està activat. En aquest cas, s'obté integrant la diferència de voltatges $V_{bus} - V_{ref}$.

3.4.3 Model dels inversors

És el component que controla el parell del seu motor elèctric respectiu. Les equacions que s'exposen a continuació són vàlides tant per l'inversor del motor com del generador. La consigna de parell ve donada pel subsistema de control. Aquesta està limitada al parell màxim segons el seu règim de velocitat angular corresponent, i la potència màxima de la màquina elèctrica. Converteix el corrent continu provinent del convertidor en un corrent trifàsic, al bobinat de l'estator.

El corrent d'entrada es calcula a través de la potència que s'entrega al motor i del voltatge del convertidor. Segons si la potència és positiva o negativa el rendiment de l'inversor es divideix o multiplica.

$$I_{inv} = \frac{V_{bus}}{\eta_{inv} \cdot P_{out}(+)} \quad (3.21)$$

$$I_{inv} = \frac{\eta_{inv} \cdot V_{bus}}{P_{out}(-)} \quad (3.22)$$

Els corrents trifàsics de sortida, denominats I_a , I_b i I_c depenen de la intensitat de pic (I_{pk}) i de l'angle del camp magnètic de l'estator. Com que és un motor síncron, els angles del rotor i estator han d'estar en fase. El model de l'inversor és ideal, i per tant, l'angle de l'estator és el mateix del rotor.

$$I_a = I_{pk} \cdot \sin \theta_s \quad (3.23)$$

$$I_b = I_{pk} \cdot \sin \left(\theta_s - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3.24)$$

$$I_c = I_{pk} \cdot \sin \left(\theta_s - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (3.25)$$

La intensitat de pic, és directament proporcional a la demanda de parell. k_e és la constant del motor [Nm/A].

$$I_{pk} = \frac{2}{3k_e} \cdot T_{M2command} \quad (3.26)$$

3.4.4 Model dels motors generadors elèctrics

En aquests blocs, es representen el funcionament de les màquines elèctriques: motor i generador. La seva eficiència ve donada per una taula de dues variables, moment i velocitat angular. Aquesta taula determina la potència que l'inversor ha d'entregar o absorbir al motor/generador corresponent, perquè pugui assolir la demanda de parell desitjada.

$$P_{invOUT}(+) = \eta_{M2} \cdot T_{M2} \cdot \omega_{M2} \quad (3.27)$$

$$P_{invOUT}(-) = \frac{T_{M2} \cdot \omega_{M2}}{\eta_{M2}} \quad (3.28)$$

La potència mecànica o útil és el producte de parell i velocitat.

$$P_{M2} = T_{M2} \cdot \omega_{M2} \quad (3.29)$$

En el cas del motor, la velocitat angular ve determinada pel sistema d'engranatges, ja que el rotor gira de forma proporcional a les rodes. Aquesta s'integra, per calcular l'angle del rotor θ_r . Pel que fa al generador, aquesta ve donada com a consigna pel sistema de control.

Mitjançant el corrent trifàsic de l'estator i θ_r , s'obté el parell mecànic, com es pot observar en la fórmula següent:

$$T_{M2} = k_e \left[I_a \cdot \sin(\theta_r) + I_b \cdot \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \cdot \sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (3.30)$$

3.5 Transmissions

3.5.1 Sistema d'engranatges

En la configuració del model, es combinen els acoblaments mecànics de parell (Torque Coupling) i de velocitat (Speed Coupling). Cada acoblament mecànic engrana tres components mecànics.

El subsistema que es mostra a continuació, està definit per quatre entrades i tres sortides. A nivell de velocitats, la del motor tèrmic (sortida 3) ve donada en funció de la corona i el generador (entrada 1). La velocitat del motor elèctric M2 (sortida 1), és proporcional a la de les rodes (entrada 4). El moment aplicat a les rodes (sortida 2) s'obté a partir dels parells desenvolupats per la corona i M2 (entrada 1). El de la corona ve donat pel parell de l'ICE (entrada 3).

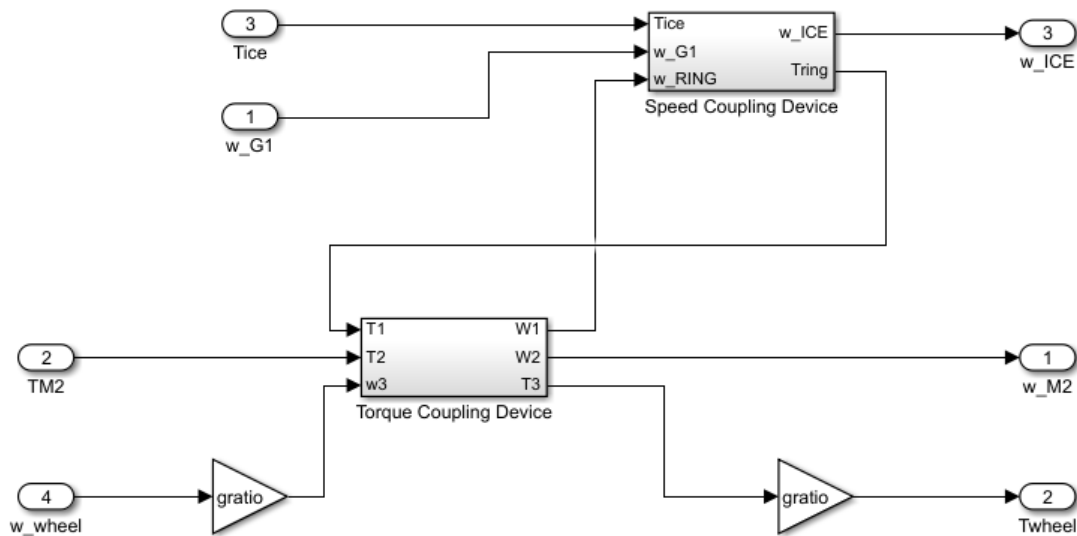


Figura 3.6: Diagrama de blocs del sistema d'engranatges. Font: Pròpia

3.5.1.1 Torque Coupling

Està constituït per tres eixos: dos d'entrada (1 i 2) i un de sortida (3). En l'arquitectura del model, la sortida és l'eix que transmet la potència al diferencial. Els eixos d'entrada són el motor M2 i la corona.

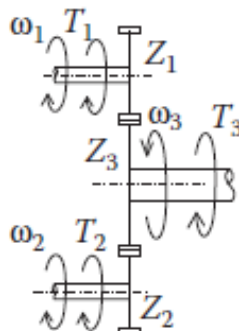


Figura 3.7: Mechanical torque coupling device. Font: [7]

Venen definits per les expressions següents, d'on k_1 i k_2 són les seves constants.

$$T_3 = k_1 \cdot T_{corona} + k_2 \cdot T_{M2} \quad (3.31)$$

$$\omega_3 = \frac{\omega_{corona}}{k_1} = \frac{\omega_{M2}}{k_2} \quad (3.32)$$

En la relació de parells hi ha un grau de llibertat. La relació de velocitats, en canvi, és fixa. El rotor del motor elèctric i la corona giren amb un velocitat proporcional a la del vehicle.

3.5.1.2 Speed Coupling

Aquest mecanisme és un engranatge planetari. Està format pel porta-satèl·lits, la corona, el planetari i els satèl·lits. La sortida és la corona. Les entrades són el motor de combustió (connectat al porta-satèl·lits), i el generador G1 (connectat al planetari). Els eixos d'entrada són el motor M2 i la corona.

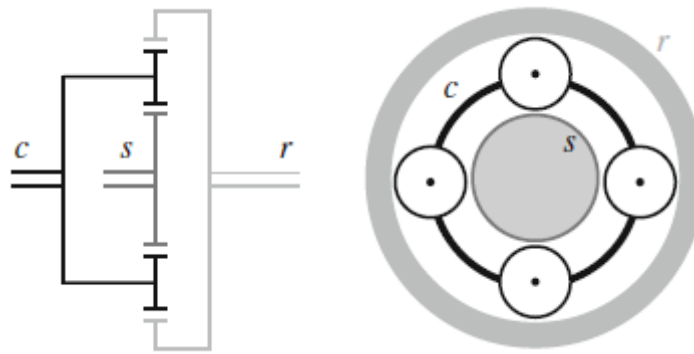


Figura 3.8: Mechanical speed coupling device. Font: [6]

Les fórmules següents defineixen les relacions de parell i de velocitats. d'on i_g és la constant del planetari.

$$T_{ICE} = \frac{T_{corona}}{k_c} = -\frac{T_{G1}}{k_g} \quad (3.33)$$

$$\omega_{corona} = \frac{1}{k_c} \cdot \omega_{ICE} - \frac{k_g}{k_c} \cdot \omega_{G1} \quad (3.34)$$

En la relació de parells hi ha un grau de llibertat. La relació de velocitats, en canvi, és fixa. El rotor del motor elèctric i la corona giren amb un velocitat proporcional a la del vehicle.

Les constants de la corona i del generador, k_g i k_c , venen determinades per la relació de transmissió de l'engrenatge planetari i_g .

$$k_c = \frac{i_g}{1 + i_g} \quad (3.35)$$

$$k_g = \frac{1}{1 + i_g} \quad (3.36)$$

3.5.1.3 Transmissió final

La relació de transmissió entre l'eix 3 i les rodes ve determinat per la relació final *gratio*.

$$T_{wheel} = gratio \cdot T_3 \quad (3.37)$$

$$\omega_{wheel} = \frac{\omega_3}{gratio} \quad (3.38)$$

3.5.2 Diagrama de bloc del pneumàtic

En la figura següent s'observa el model del pneumàtic. La velocitat instantània del cotxe defineix la de les rodes; i el parell de les rodes, la força de tracció del vehicle.

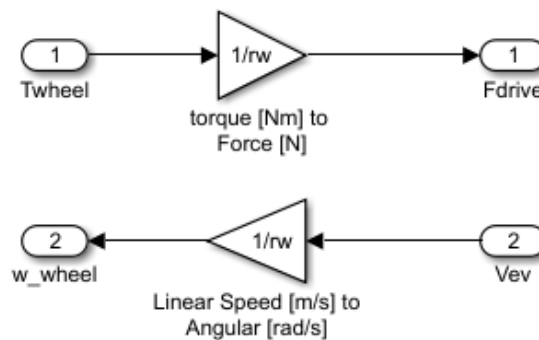


Figura 3.9: Subsistema del pneumàtic. Font: Pròpia

El paràmetre que defineix les equacions que el representen és el radi de la roda.

$$F_{drive} = \frac{T_{wheel}}{r_w} \quad (3.39)$$

$$V_{HEV} = \omega_{wheel} \cdot r_w \quad (3.40)$$

3.6 Estratègia de control

En el diagrama següent es mostra l'estratègia de control emprada, a l'hora de desenvolupar el model. La seva funció consisteix en determinar les consignes necessàries per controlar els tres motors, a partir d'uns senyals d'entrada. La configuració híbrida Split-Parallel té dos graus de llibertat, que són la velocitat i parell del motor tèrmic (T_{ICE} i ω_{ICE})[6]. Aquests es determinen a través d'un control lògic. La resta de consignes (ω_{G1} , T_{M2} , T_{G1} , gas) depenen dels valors de T_{ICE} i ω_{ICE} . En l'apartat següent, està detallat el funcionament del subsistema del control del model de Simulink.

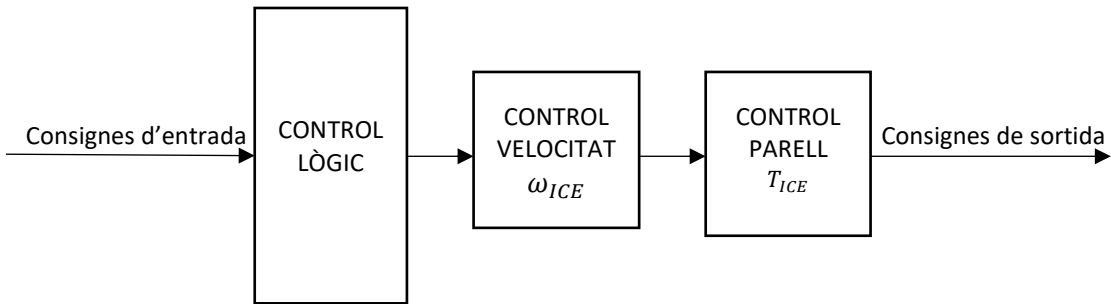


Figura 3.10: Diagrama de blocs de l'estratègia de control. Font: Pròpia

Els dos graus de llibertat permeten diferents modes de funcionament. En el gràfic que es mostra a continuació, s'han representat en funció de la força motriu i la velocitat del vehicle. Hi ha tres àrees principals: Tracció elèctrica (EV), tracció híbrida (HEV) i tracció elèctrica/híbrida (EV/HEV).

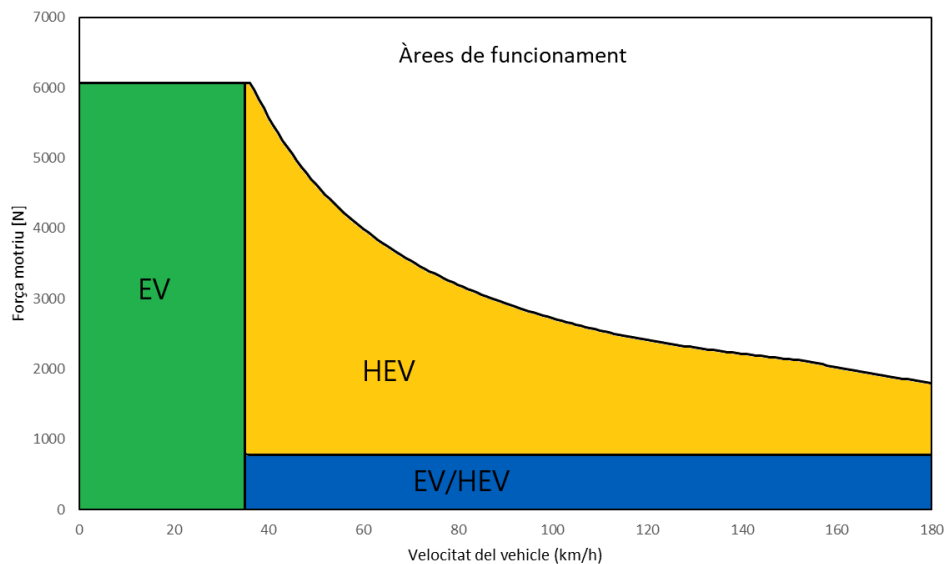


Figura 3.11: Força motriu màxima en funció de la velocitat. Font: Pròpia

3.6.1 Tracció elèctrica (EV)

A baixes velocitats i per sota un llindar de potència determinat, la tracció és elèctrica, i només treballa el motor M2. Això també succeeix quan la demanda de força és negativa, en què M2 actua com a generador.

El funcionament de les regions HEV i EV/HEV depèn de l'estat de càrrega de la bateria (SOC), atès que s'intenta mantenir en un rang determinat (SOC_L - SOC_H). L'estratègia de control en aquestes regions està basada en la *Max. SOC of PPS Control Strategy*[7], que consisteix en entregar la demanda de potència requerida pel conductor, mantenint un estat de càrrega elevat.

3.6.2 Tracció híbrida (HEV)

En aquesta regió el motor de combustió entrega el parell màxim corresponent al règim de velocitats. El moment que desenvolupa el motor elèctric correspon a la diferència entre la demanda de parell del vehicle i el desenvolupat per l'ICE.

$$T_{ICE} = T_{ICEmax} \quad (3.41)$$

$$T_{M2} = \frac{F_{drive} \frac{r_w}{gratio} - k_1 \cdot k_c \cdot T_{ICE}}{k_2} \quad (3.42)$$

3.6.3 Tracció elèctrica/Híbrida (EV/HEV)

En aquesta regió es va alternant la tracció elèctrica i híbrida en funció de l'estat de càrrega. L'àrea EV/HEV està situada per sota una força determinada, que és equivalent al parell òptim del motor tèrmic. Els llindars SOC_L i SOC_H determinen la distribució dels parells.

Quan l'estat de càrrega és inferior al llindar SOC_L , l'ICE treballa a un parell òptim (superior a la demanda). En aquest cas, M2 actua com a generador.

$$T_{ICE} = T_{ICEopt} \quad (3.43)$$

$$T_{M2} = \frac{F_{drive} \frac{r_w}{gratio} - k_1 \cdot k_c \cdot T_{ICE}}{k_2} \quad (3.44)$$

D'altra banda, quan l'estat del SOC és superior al llindar SOC_H , només treballa el motor de tracció elèctric.

$$T_{ICE} = 0 \quad (3.45)$$

$$T_{M2} = \frac{F_{drive} \cdot \frac{r_w}{gratio}}{k_2} \quad (3.46)$$

Quan l'estat de càrrega està comprès en l'interval SOC_L - SOC_H , el motor de combustió es va engegant i apagant, com es pot observar en el gràfic següent. Si està en funcionament, una part de la potència que desenvolupa carrega la bateria fins que arriba al límit superior, en què s'atura. A partir d'aquell moment M2 entrega el parell necessari. En el moment en què el SOC és inferior al SOC_L , l'ICE es torna a engegar. Això també succeeix quan es supera un llindar de potència determinat.

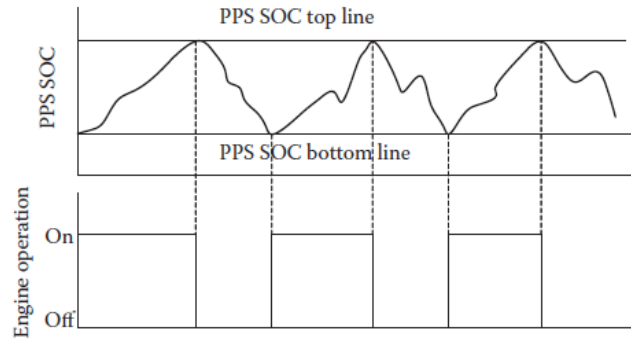


Figura 3.12: Funcionament del motor de combustió en règim permanent. Font: [7]

Normalment, aquest estat es produeix en un règim permanent de velocitat. Aquest mode de funcionament s'utilitza per evitar que l'estat de càrrega s'estabilitzi en els llindars inferior o superior.

En la gràfica següent es mostren les dues corbes de parell esmentades[8].

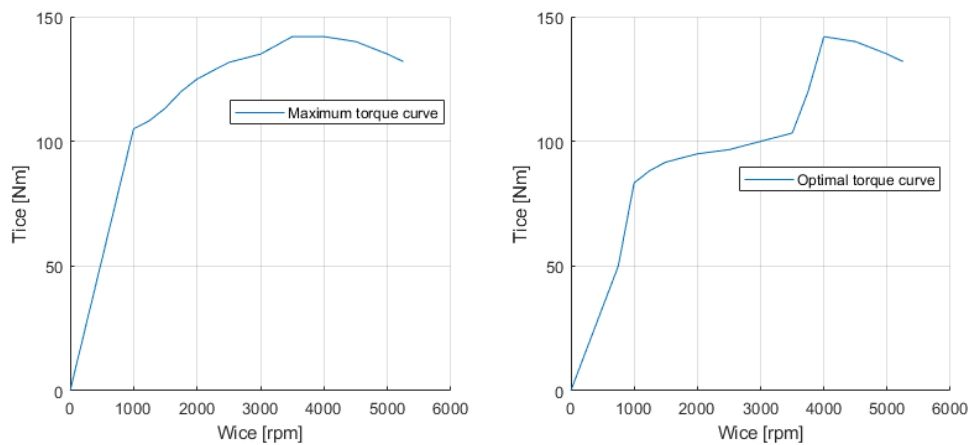


Figura 3.13: Corbes de parell màxim i òptim. Font: Pròpia

El motor treballa en la corba de parell màxim quan la demanda de força és superior al llindar esmentat. Per contra, si la força de tracció no arriba a aquest llindar, treballa en la corba òptima.

3.6.4 Control de velocitats

Com s'ha mencionat a l'inici d'aquest apartat, la velocitat angular del motor de combustió es pot controlar de forma indirecta gràcies al generador. En el model, el control lògic determina els seus valors. En la figura següent es mostren els valors que pot prendre el motor quan està en funcionament.

Quan es treballa a parell o potència màxima, les revolucions segueixen una recta que només depèn de la velocitat. La recta està calibrada per tal de que el generador pugui absorbir la màxima potència, que a la vegada augmenta la potència total del drivetrain. D'altra banda, quan es treballa a un parell òptim, les revolucions també depenen de l'estat de càrrega, a part de la velocitat del cotxe. L'àrea de funcionament òptima s'ha determinat amb una recta, calibrada per que la potència del generador sigui nul·la (mantenint els valors per sobre del ralenti). A partir d'aquí el SOC modula aquesta recta per tal d'estabilitzar-se al voltant del 60%[9]. Per sota aquest llindar, el generador carrega la bateria; i per sobre, entrega potència a les rodes.

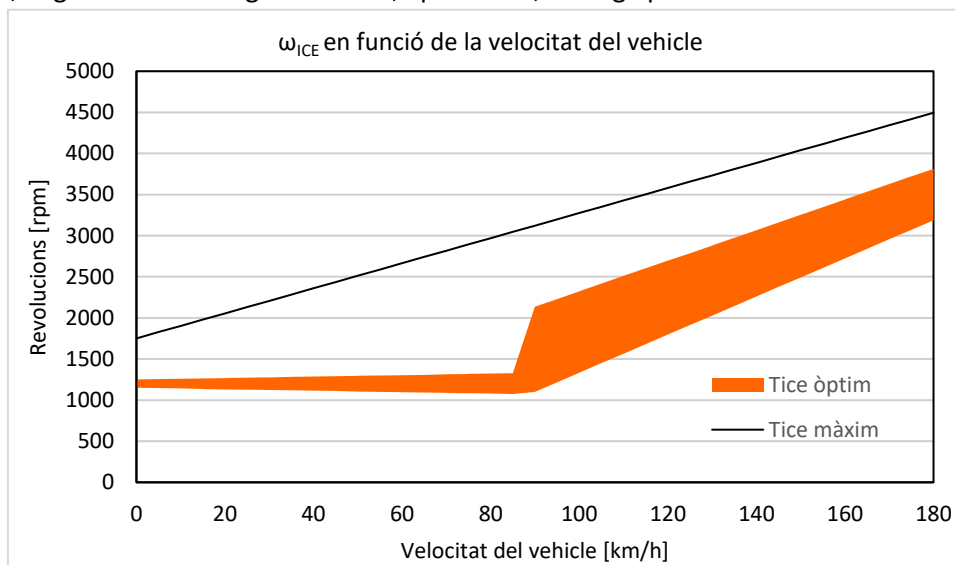


Figura 3.14: Estratègia de control de les revolucions del motor tèrmic. Font: Pròpia

El rang de velocitats del model arriba fins a 180 km/h. Per sota de 35km/h, la propulsió només és elèctrica, i només treballa el motor M2. El seu rotor gira solidàriament a les rodes. La velocitat de la corona també.

El generador sempre gira positivament excepte a baixes velocitats i a l'arrancada del motor de combustió. A baixes velocitats, el rotor gira de forma negativa degut a les relacions de transmissió dels engranatges, però no entrega ni absorbeix potència. Per contra, a l'arrancada del motor, entrega potència momentàniament per tal d'accionar-lo.

3.7 Sistema de control

A continuació es mostra el bloc de control de Simulink. La seva funció és implementar l'estratègia de control. Determina el funcionament dels motors en funció dels senyals d'entrada. Aquests són la velocitat, la consigna de força i l'estat de càrrega (SOC). Les consignes de sortida són la velocitat del generador G1, els parells dels motors/generadors M2 i G1, i el gas del motor de combustió (throttle).

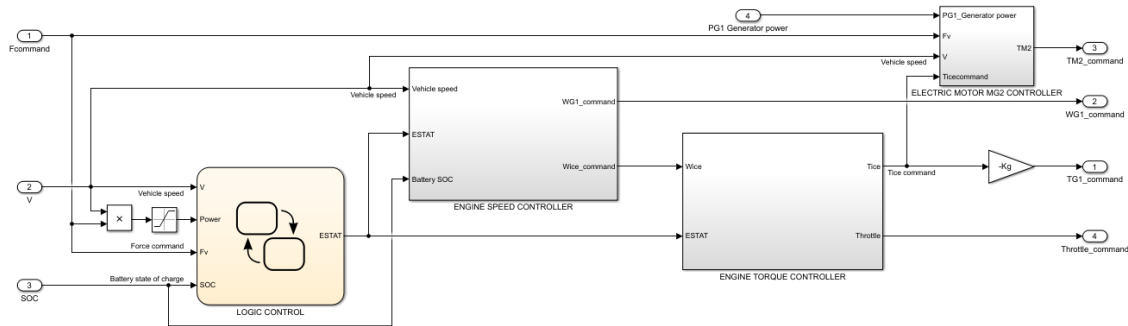


Figura 3.15: Bloc de control. Font: Pròpia

Està constituït per quatre subsistemes, *Logic control*, *Engine speed controller*, *Engine torque controller*, *Electric motor MG2 controller*. En el bloc de control lògic, les variables d'entrada determinen l'estat de funcionament. A continuació, el controlador de velocitat determina la velocitat del motor de combustió i la consigna de velocitat del generador. El controlador de parell de l'ICE, depenent de l'ESTAT i ω_{ICE} , escull el moment que es vol obtenir, i la consigna de gas per tal d'obtenir-lo. Finalment, es determina els parells de M2 i G1.

3.7.1 Logic control

S'ha desenvolupat amb *Stateflow*, que és una llibreria de control lògic de Simulink. A partir d'unes variables lògiques, s'obté una sortida, que s'ha anomenat *ESTAT*. El seu valor pot ser 1, 2 o 3. Aquesta variable actua com un selector, atès que determina el comportament dels motors.

Els seus valors són equivalents a les regions de funcionament. L'estat 1 representa la tracció elèctrica, l'estat 2 la regió híbrida de baixa tracció, i l'estat 3 la tracció híbrida elevada.

Les variables lògiques són l'estat de càrrega de la bateria, la velocitat, i les consignes de força i potència.

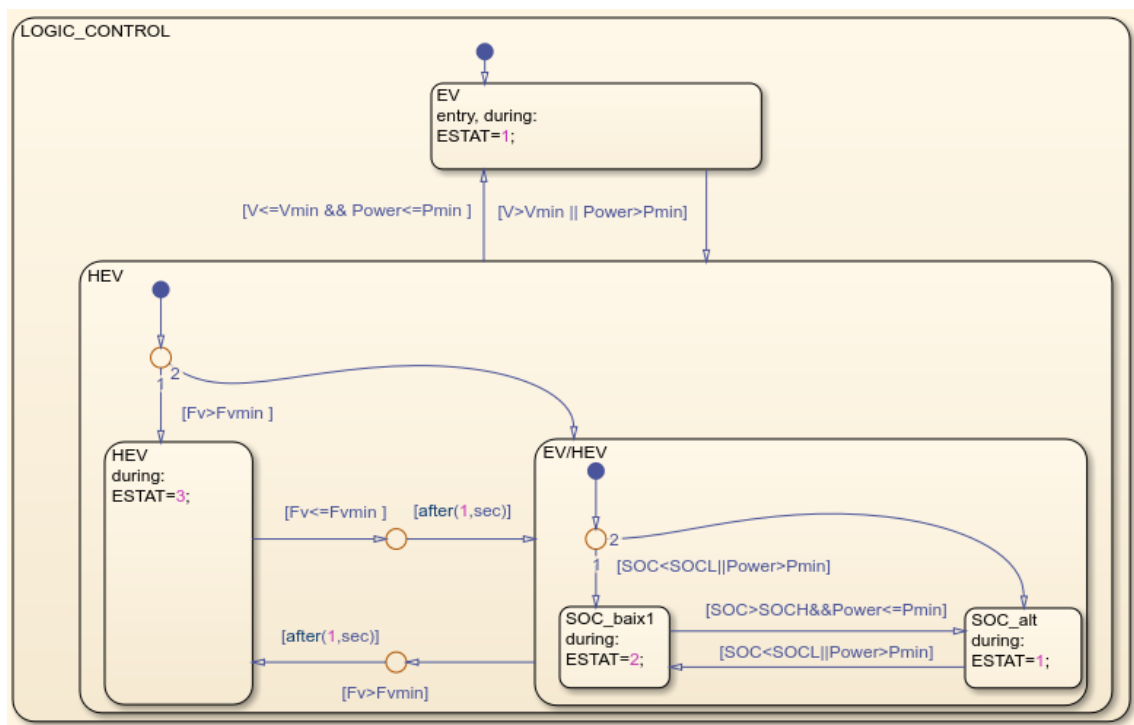


Figura 3.16: Diagrama d'estats lògics. Font: Pròpia

L'estat inicial és 1 (EV). Aquest es manté (o s'activa) quan la velocitat i la potència són inferiors a uns llindars determinats. En cas contrari, s'activa el funcionament híbrid del cotxe. Com s'ha mencionat hi ha dues regions de funcionament híbrides. Si la consigna de força és superior al llindar de força F_{Vmin} , s'activa l'estat 3. Per sota de llindar de força, els estats 1 i 2 es van alternant, en funció del SOC i la potència. Quan l'estat de càrrega és inferior a SOC_L o la potència és superior a P_{min} , s'activa l'estat 2. Sinó és així, es passa a l'estat 1. Aquest també s'engega quan el SOC és superior a SOC_H i la potència sigui inferior al seu llindar.

3.7.2 Engine speed controller

Per controlar la velocitat angular del motor de combustió s'ha emprat el bloc *Matlab Function*. La velocitat desitjada s'obté mitjançant el control de ω_{G1} . Per una velocitat del vehicle determinada V_{HEV} i la ω_{ICE} desitjada, es calcula la consigna de velocitat angular del generador. La relació de velocitats s'obté a partir de les equacions 3.32, 3.34, 3.38 i 3.40 de l'apartat de transmissions.

$$\omega_{G1} = \frac{1}{k_g} \cdot \omega_{ICE} - \frac{k_c \cdot k_1 \cdot gratio}{k_g \cdot r_w} \cdot V_{HEV} \quad (3.47)$$

El bloc de control de la velocitat del motor representa l'equació anterior.

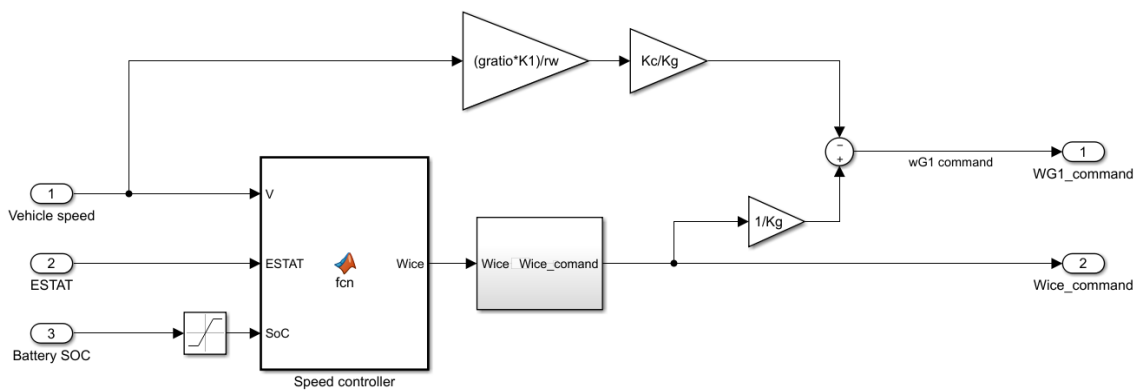


Figura 3.17: Engine Speed Controller. Font: Pròpia

El bloc Matlab Function implementa el control de velocitat mencionat en l'apartat anterior. Quan el selector ESTAT és 1, la consigna de ω_{ICE} és nul·la.

Si la conducció és híbrida amb una força de tracció baixa (ESTAT 2), les fórmules següents determinen la consigna de velocitat del motor.

Per $V < 23,61 \text{ m/s}$

$$\omega_{ICE} = 125,66 + Pwr2 \cdot (83,78 + 5,39 \cdot V) \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (3.48)$$

Per $V \geq 23,61 \text{ m/s}$

$$\omega_{ICE} = 125,66 + 7,88 \cdot (V - 23,61) + 5 \cdot SOC \cdot (188,50 - 2,74 \cdot (V - 23,61)) \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (3.49)$$

Quan la demanda de tracció del vehicle és elevada (ESTAT 3), ω_{ICE} ve donada per aquesta recta.

$$\omega_{ICE} = 183,24 + 5,76 \cdot V \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (3.50)$$

Per aconseguir una consigna contínua, que simuli la inèrcia del motor, s'ha emprat una funció de transferència de primer ordre.

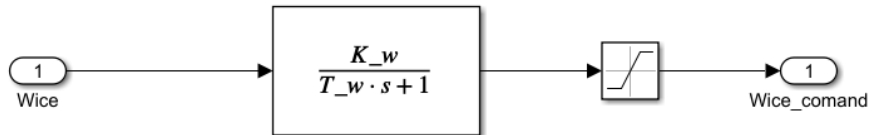


Figura 3.18: Funció de transferència Wice. Font: Pròpia

3.7.3 Engine torque controller

Per a controlar el parell, també s'ha emprat una Matlab Function. Els valors de la variable ESTAT controlen les consignes del motor.

Si és 1, només treballa M2, i per tant la consigna T_{ICE} és nul·la. En la zona híbrida en què la força de tracció és baixa (estat 2), el parell segueix una corba òptima, que depèn de la consigna ω_{ICE} . En l'estat 3, el vehicle necessita que el motor entregui el màxim de força, i per tant, segueix la corba de parell màxim. Com en el cas anterior, s'ha emprat una funció de transferència de primer ordre, perquè la consigna sigui contínua.

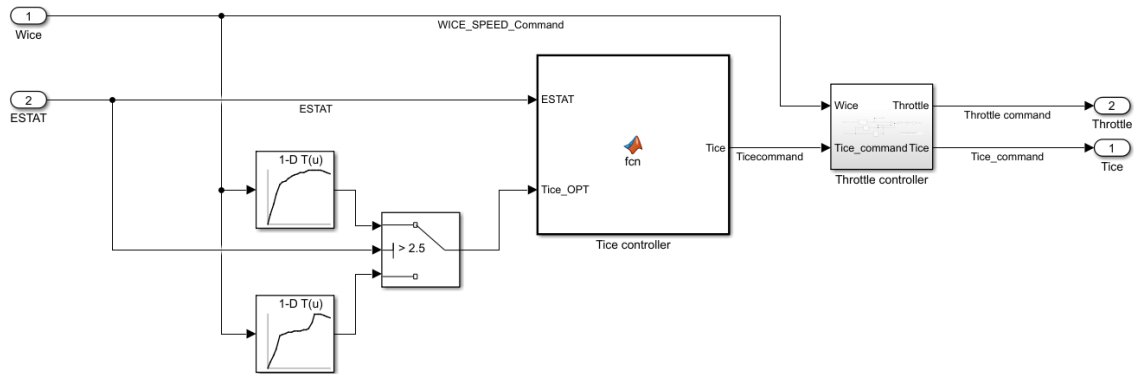


Figura 3.19: Engine torque controller. Font: Pròpia

El motor tèrmic es controla mitjançant el gas. Per tal de transformar la senyal de parell a gas, s'ha emprat l'expressió següent:

$$Gas = 100 \cdot \frac{T_{ICEcommand} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (3.51)$$

Els parells màxim T_{max} i mínims T_{min} corresponen al règim de velocitats del motor de combustió interna.

3.7.4 Electric motor MG2 controller

El subsistema determina la consigna del motor de tracció elèctric. Bàsicament, depèn de les consignes de força i $T_{ICEcommand}$. Les equacions que es mostren a continuació s'han obtingut a partir de les expressions 3.31, 3.33, 3.37 i 3.39 de l'apartat de transmissions.

$$T_{M2} = \frac{F_{drive} \frac{r_w}{gratio} - k_1 \cdot k_c \cdot T_{ICE}}{k_2} \quad (3.52)$$

Tot i així, les potències del generador i de la bateria delimiten el seu funcionament. Per evitar que la bateria es carregui o descarregui a una potència superior a la nominal, el moment elèctric del motor està limitat per l'expressió següent:

$$T_{M2max} = \frac{\frac{r_w \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{boost} \cdot \eta_{M2}}{gratio \cdot k_2} \left(P_{bat} - \frac{P_{G1}}{\eta_{inv} \cdot \eta_{boost}} \right)}{V_{HEV}} \quad (3.53)$$

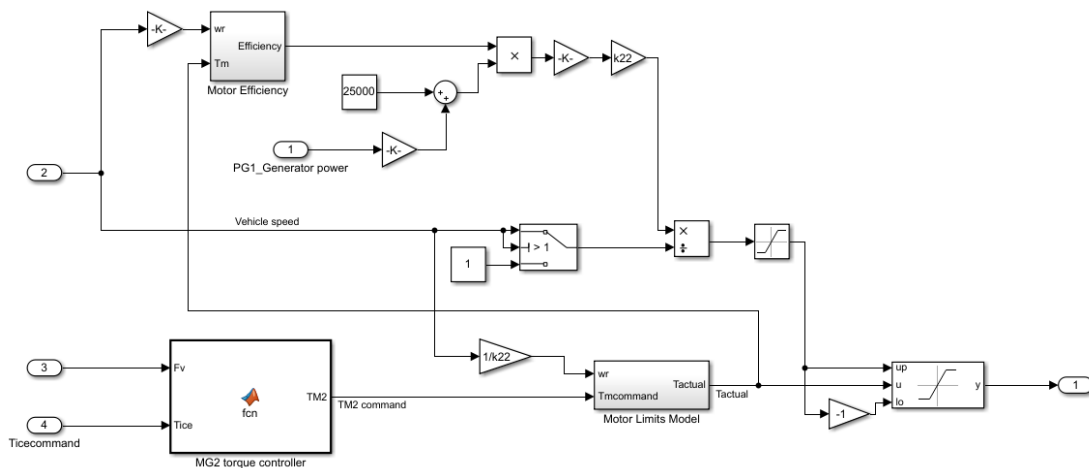


Figura 3.20: Subsistema de control del motor elèctric MG2. Font: Pròpia

L'eficiència del motor elèctric no s'ha considerat constant, a diferència de l'inversor i el convertidor. Els valors depenen d'un moment i velocitat angular determinats. El moment ve donat per la consigna T_{M2} (prèviament limitada als límits físics del motor). La velocitat ω_{M2} és directament proporcional a la del cotxe.

$$\omega_{M2} = V_{HEV} \cdot \frac{gratio \cdot k_2}{r_w} \quad (3.54)$$

4. Validació del model – Toyota Prius

En aquest capítol es validarà el model desenvolupat.

A les taules següents es mostren les diferents característiques que defineixen el cotxe. Aquestes són del Prius actual (quarta generació). Les simulacions del model s'han efectuat amb els paràmetres de les taules. A nivell de vehicle, s'ha considerat les dimensions, prestacions i especificacions ambientals. Les condicions de la carretera corresponen als paràmetres físics. La resta de paràmetres defineixen els components del tren de potència. Motor de combustió interna, dipòsit de combustible, bateria elèctrica, convertidor, motors elèctrics, inversors i transmissions.

Dimensions vehicle		Paràmetres físics	
Massa del vehicle en buit [kg]	1400	Densitat aire [kg/m ³]	1,204
Amplada total [mm]	1760	Coeficient <i>drag</i>	0,24
Alçada total [mm]	1475	Coeficient fricció	0,01
Àrea frontal estimada [m ²]	2,19		
Motor de combustió interna		Dipòsit de combustible	
Potència màxima [kW]	72	Densitat gasolina [g/dm ³]	680
Parell màxim [Nm/rpm]	142/3600	Capacitat [l]	43
Bateria elèctrica (Ni-Mh)		Convertidor DC/DC	
Capacitat [kWh]	1,31	Voltatge V_{bus} [V]	650
Voltatge nominal [V]	201,6	Rendiment	0,98
Potència màxima [kW]	27	Inversors	
Intensitat màxima [A]	25	Rendiment	0,975
Motor elèctric MG2		Generador elèctric MG1	
Parell màxim [Nm]	163	Parell màxim [Nm]	40
Revolucions màximes [rpm]	17000	Revolucions màximes [rpm]	17000
Potència màxima [kW]	53	Potència màxima [kW]	23
Transmissions			
Relació de transmissió del planetari i_g	2,6	Relació de transmissió <i>gratio</i>	3,476
Relació de transmissió k_1	0,82	Radi del pneumàtic [m]	0,315
Relació de transmissió k_2	3,12		

Taula 3: Paràmetres principals del vehicle i dels components del drivetrain. Font: [2] [10][11]

Prestacions		Especificacions mediambientals	
Temps d'acceleració 0-100 km/h [s]	10,8	Consum combinat [l/100 km]	4,1-4,7
Velocitat màxim [km/h]	180	Emissions CO ₂ combinat [g/km]	94-107
Potència màxima [kW]	90		

Taula 4: Prestacions i especificacions mediambientals del Toyota Prius. Font: [10]

4.1 Motor de combustió

A partir de l'equació del capítol anterior (3.11), s'ha obtingut el mapa de parell del motor del Prius. D'aquesta manera, s'aconsegueix simular el comportament energètic del motor de combustió. Per un percentatge de gas i velocitat angular donats, el bloc de Simulink de l'ICE genera un parell, a partir del mapa.

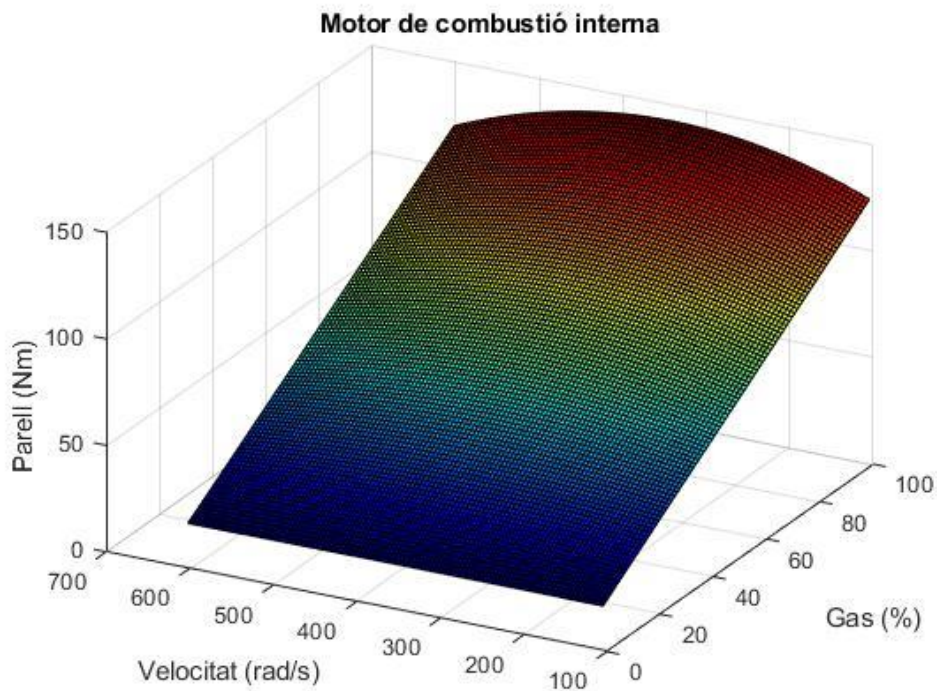


Figura 4.1: Parell en funció de la velocitat angular i el gas. Font: Pròpia

A continuació podem observar els mapes de consum de combustible i emissions de CO₂ emprats en el model. Com s'han mencionat en el capítol anterior, aquests s'han adaptat del bloc Mapped SI Engine, tenint en compte les característiques del motor.

El consum de gasolina gairebé és directament proporcional a les revolucions i parell desenvolupats.

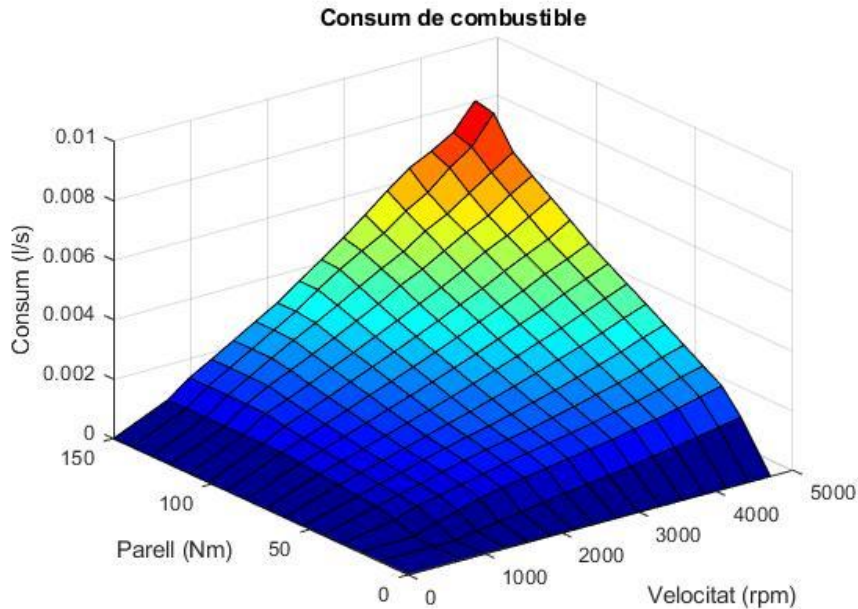


Figura 4.2: Mapa de consums, en funció del parell i velocitat desenvolupats. Font: [5]

Les emissions de diòxid de carboni, augmenten tant amb parells i velocitats elevades, tot i que com es pot observar en el mapa, amb la velocitat aquest augment és més important.

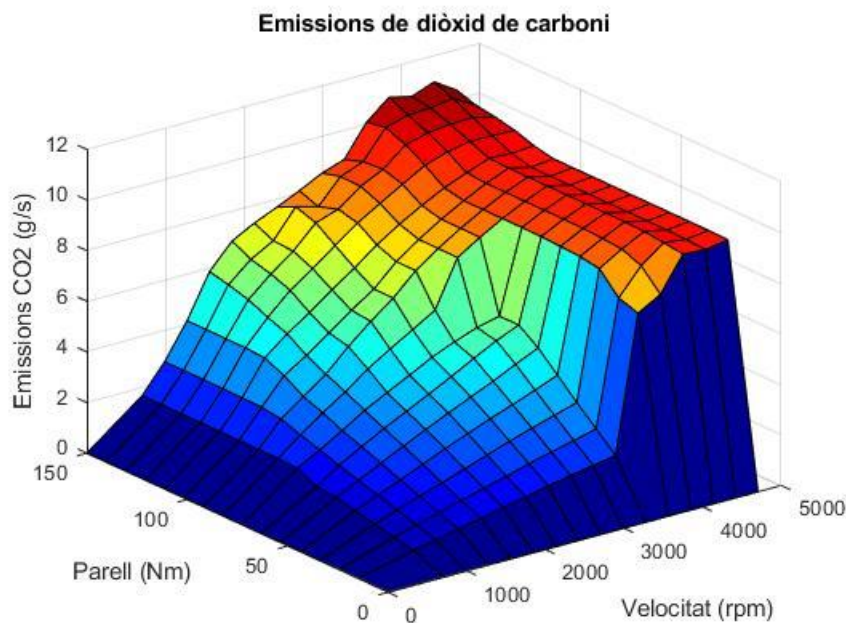


Figura 4.3: Mapa d'emissions, en funció del parell i velocitat desenvolupats. Font: [5]

4.2 Mapes d'eficiència motors elèctrics

En les gràfiques següents, es mostren els mapes d'eficiència de les màquines elèctriques del tren de potència, generador i motor. Estan adaptades del model de vehicle elèctric Nissan Leaf amb les prestacions respectives de cada motor/ generador. Les eficiències màximes i mínimes s'han adaptat perquè s'apropin més als valors reals[2]. El rendiment està expressat en tant per u. La regió en què poden treballar està delimitada per la corba de parell màxim. Quan actuen com a generadors els parells són negatius. El mapa d'eficiència utilitzat en aquests casos és idèntic.

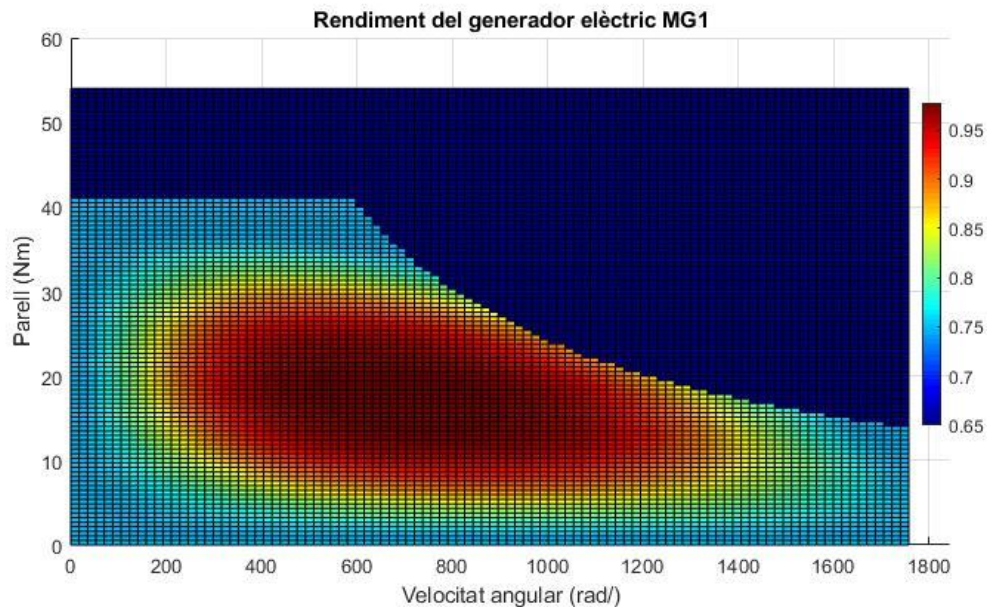


Figura 4.4: Mapa d'eficiència del generador. Font: Pròpia

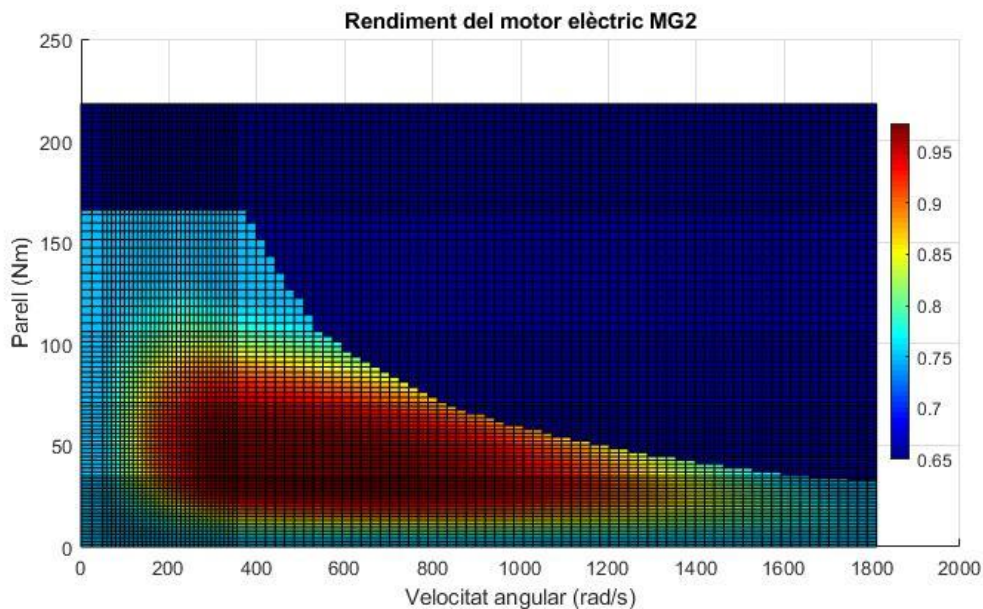


Figura 4.5: Mapa d'eficiència del motor elèctric. Font: Pròpia

4.3 Resultats simulació cicle de conducció WLTP 3b

Per a validar el model, s'han comparat els resultats de la fitxa tècnica del fabricant amb els valors obtinguts a la simulació, seguint el mateix cicle de conducció. Un cicle de conducció és un perfil de velocitats en funció del temps. El cicle emprat per a determinar els consums i emissions d'un automòbil és el WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) com s'ha mencionat anteriorment, i té una durada de 30 minuts.

Les sis figures següents corresponen als resultats de la simulació del cicle WLTP 3b. Cada una d'elles està formada per tres gràfiques.

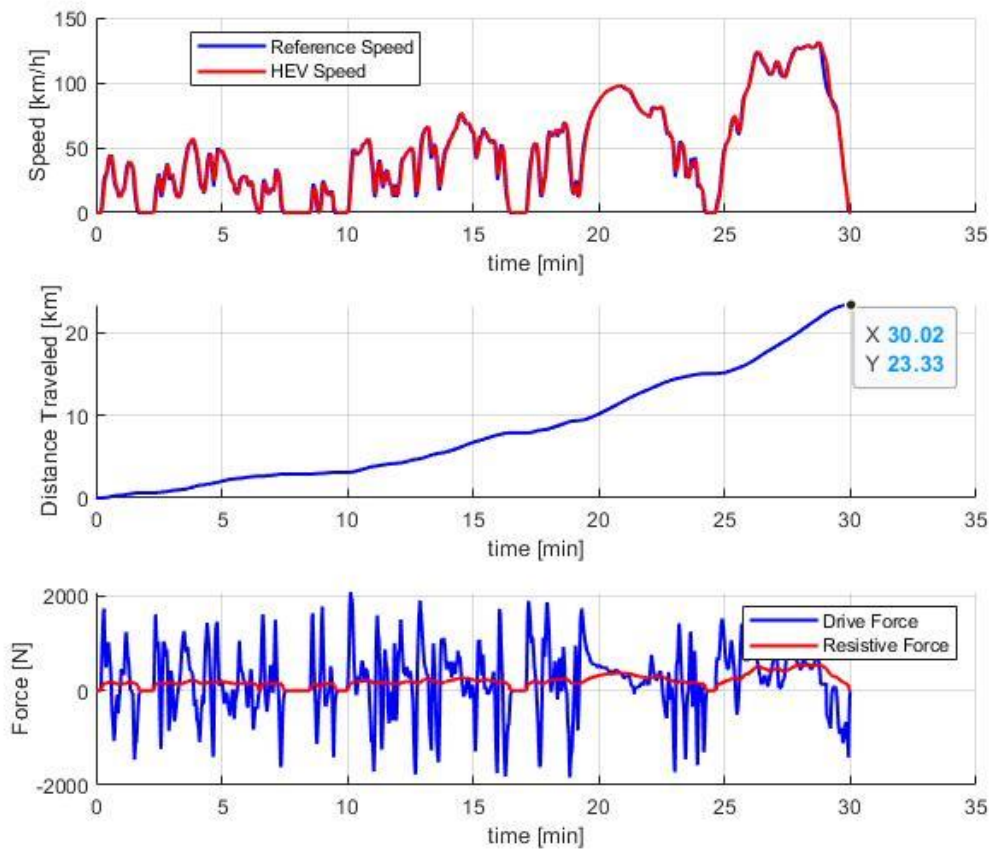


Figura 4.6: Resultats cicle WLTP 3b: velocitats, distància recorreguda i forces. Font: Pròpia

En la gràfica de la primera figura s'hi pot observar el perfil de velocitats. La velocitat del vehicle, representada en vermell, s'ajusta a la velocitat del cicle o referència, de color blau. En la segona gràfica està representada la distància recorreguda en funció del temps. La distància simulada és de 23,3 km. En l'última, estan representades les forces de tracció i resistents del cotxe, de colors blau i vermell respectivament.

En la segona figura, podem observar la potència, el SOC i les intensitats.

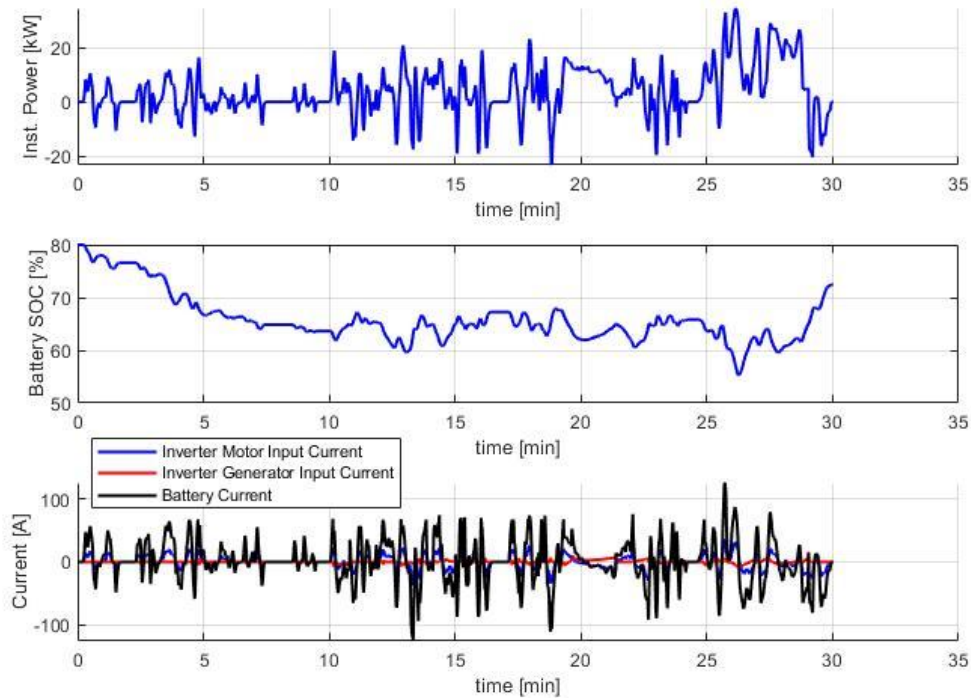


Figura 4.7: Resultats cicle WLTP 3b: potència, estat de càrrega (SOC) i intensitats. Font: Pròpia

La primera gràfica correspon a la potència instantània que desenvolupa el turisme. Quan els seus valors són negatius, significa que s'està recuperant energia, amb la frena regenerativa. El motor M2 treballa com a generador, i es carrega la bateria elèctrica. Inicialment, es parteix d'un estat de càrrega del 80%. La intensitat de la bateria, en negre, és positiva quan aquesta està cedint energia, i negativa quan s'està carregant. Els corrents en blau i en vermell són els d'entrada dels inversors del motor i del generador.

En la figura següent, està representat el funcionament dels 3 motors durant el cicle de conducció. En negre, el motor de combustió ICE; en blau, el motor elèctric M2; i en vermell, el generador G1.

S'hi pot observar els parells, les velocitats angulars (en revolucions per minut) i la potència.

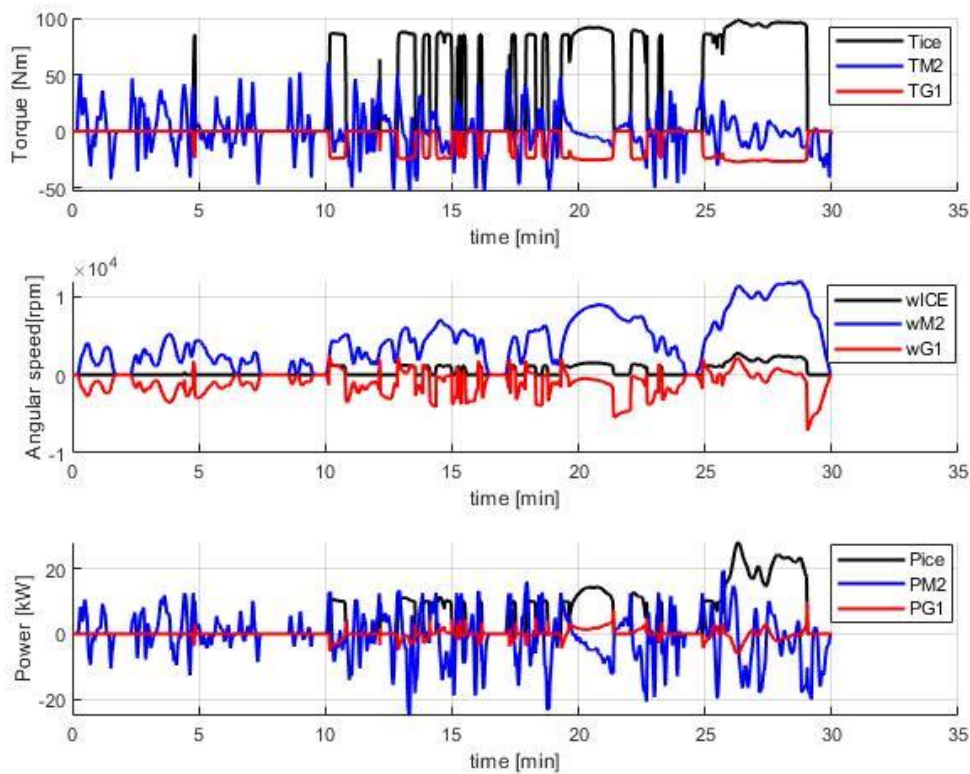


Figura 4.8: Resultats cicle WLTP 3b: parells, velocitats angular i potències. Font: Pròpia

Com s'ha mencionat en el capítols anteriors, la força de tracció del vehicle l'efectuen en paral·lel el motor tèrmic i l'elèctric M2. Per a velocitats baixes o forces relativament petites, el motor elèctric té un major protagonisme. Per contra, quan les forces són elevades, el motor tèrmic és el que desenvolupa més potència. En aquest cas, quan està en funcionament treballa a un parell òptim. El parell T_{M2} és positiu o negatiu segons la demanda total de parell. És a dir, ajuda al motor de combustió a propulsar el vehicle o recupera una part de la potència sobrant que aquest desenvolupa. El parell del generador sempre és negatiu.

En la segona gràfica de la figura, es mostren les velocitats. La del motor elèctric sempre és proporcional a la del cotxe, atès que el seu rotor gira solidàriament amb l'eix de la transmissió final. La velocitat del generador, gairebé sempre és negativa, cosa que significa que està absorbint una part de la potència de l'ICE, per carregar la bateria. L'estratègia de control del vehicle, intenta que la velocitat del motor de combustió sigui sempre superior al ralenti, quan aquest està en funcionament.

Finalment, en la tercera gràfica, estan representades les potències instantànies de cada motor, que són el producte del seu parell i velocitat.

En la quarta figura de resultats del cicle WLTP 3b, s'hi ha representat els litres del dipòsit de gasolina, el consum i emissions mitjanes.

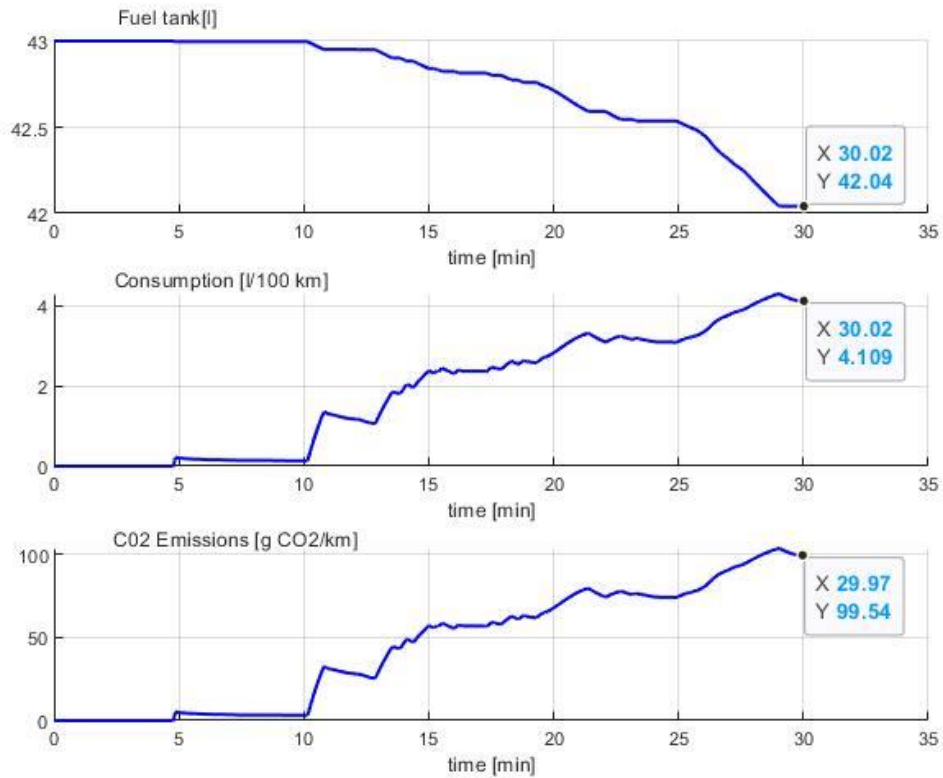


Figura 4.9: Resultats cicle WLTP 3b: litres de combustible, consum i emissions. Font: Pròpia

El consum mitjà seguint el cicle WLTP 3b és de 4,1 l/100 km, i les emissions mitjanes de diòxid de carboni de 99,5 g CO₂.

En aquesta figura s'ha representat el rati *Power-Split*, que mostra el grau d'híbridació de la força de tracció, i la potència de la bateria.

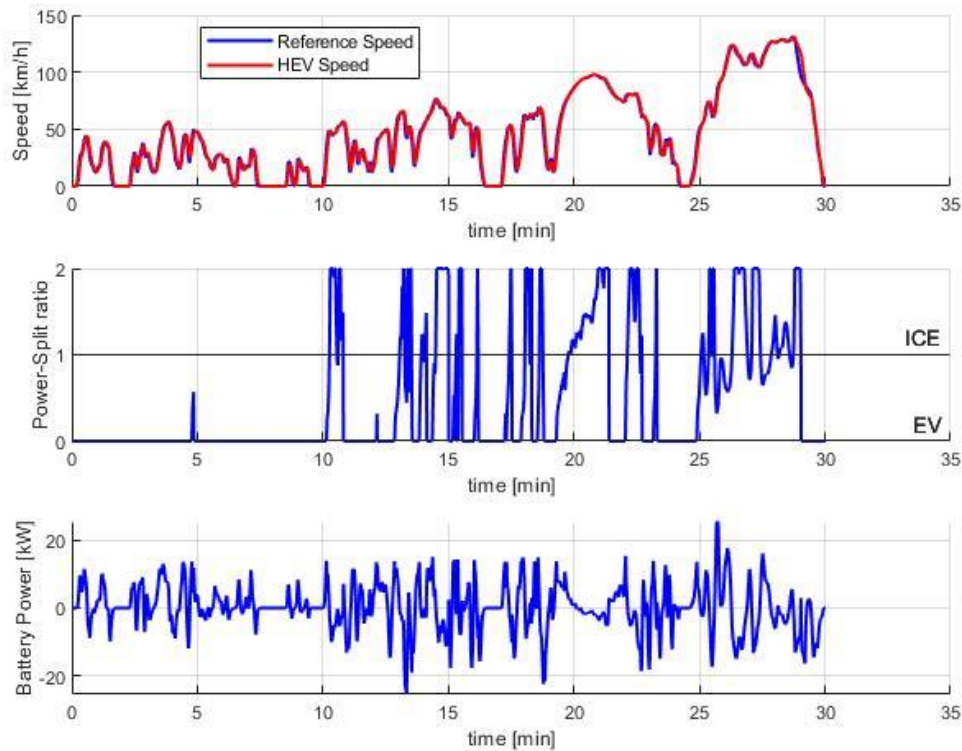


Figura 4.10: Resultats cicle WLTP 3b: Power-Split rati, potència de la bateria. Font: Pròpia

La segona gràfica permet observar el tipus de tracció del vehicle en cada instant. Quan és zero la conducció és 100 % elèctrica, i quan és u, l'efectua només el motor tèrmic. Els valors compresos entre zero i u signifiquen que la propulsió és híbrida. En els valors superiors a u, el motor M2 actua com a generador, atès que el motor de combustió produeix més potència de la necessària i s'està carregant la bateria.

En l'última gràfica es mostra la potència instantània de la bateria. Quan és positiva, aquesta entrega potència; i quan és negativa n'absorbeix.

En l'última figura podem observar els cicles de conducció dels tres motors. Aquests representen els diferents punts de treball durant la simulació WLTP 3b.

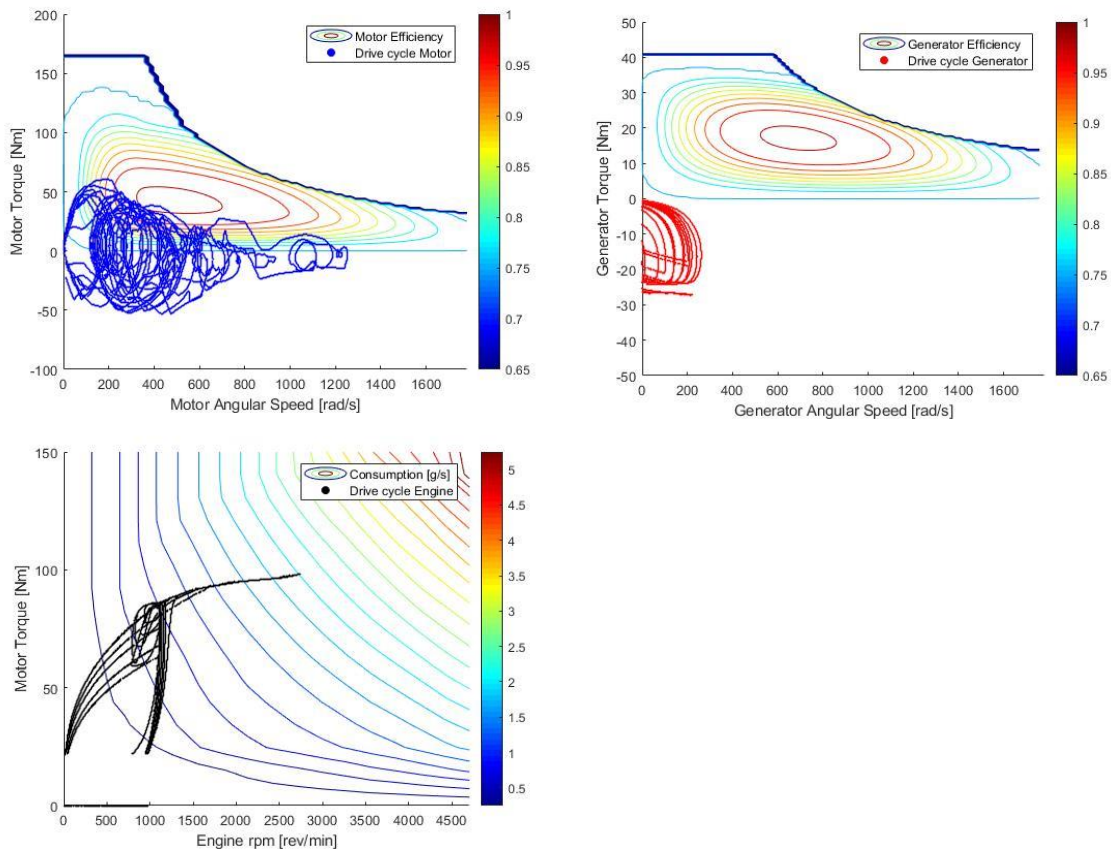


Figura 4.11: Resultats cicle WLTP 3b: Punts de treball dels motors. Font: Pròpia

El motor de tracció elèctric principal (representat en blau), treballa en parells positius i negatius. Els valors més elevats corresponen a quan la tracció del vehicle és completament elèctrica. Quan el vehicle està treballant en les regions híbrides, la seva funció és afegir o absorbir parell respecte el que entrega el motor de combustió.

Com es pot observar en la figura, la majoria dels punts de funcionament de l'ICE (en negre), estan situats sobre una corba. Les variacions sobre aquesta són degudes a l'estat de càrrega. Normalment treballa en el rang de 1000-1500 revolucions per minut. Els punts en els quals el parell és nul indiquen que el motor no està en funcionament.

En la gràfica de la dreta, es mostren els punts de treball del generador (en blau). Cal remarcar, que el mapa d'eficiències és simètric pels parells positius i negatius. Com s'observa, el moment del generador sempre és negatiu.

4.4 Resultats simulació acceleració 0-100 km/h

Com en l'apartat anterior, es mostraran els diferents resultats obtinguts per una consigna de velocitat constant de 120 km/h. Els resultats mostren que el temps d'acceleració de 0 a 100 km/h és de 12,15 s.

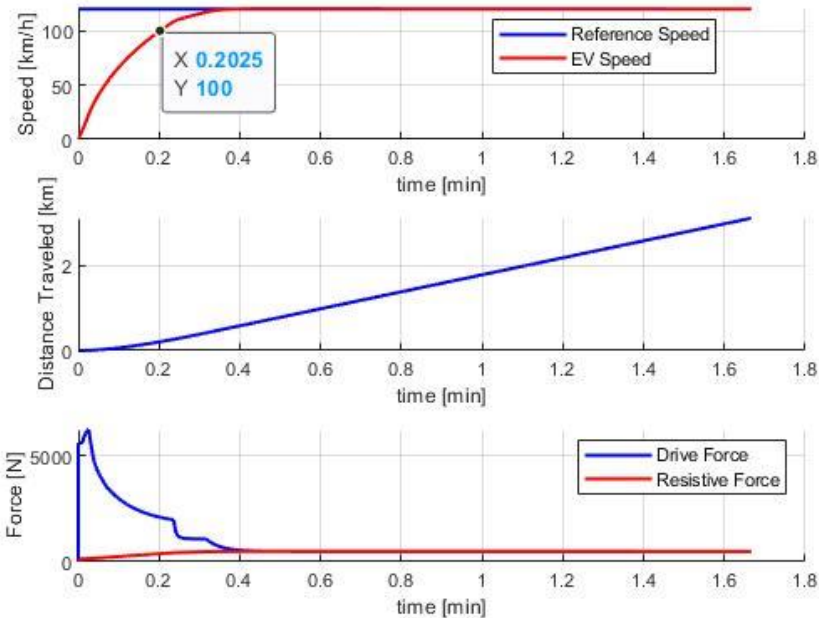


Figura 4.12: Resultats acceleració 0-100 km/h: velocitats, distància recorreguda i forces. Font: Pròpia

Durant l'acceleració, tant la força de tracció com les intensitats i la potència instantània, són molt superiors als seus valors en règim permanent.

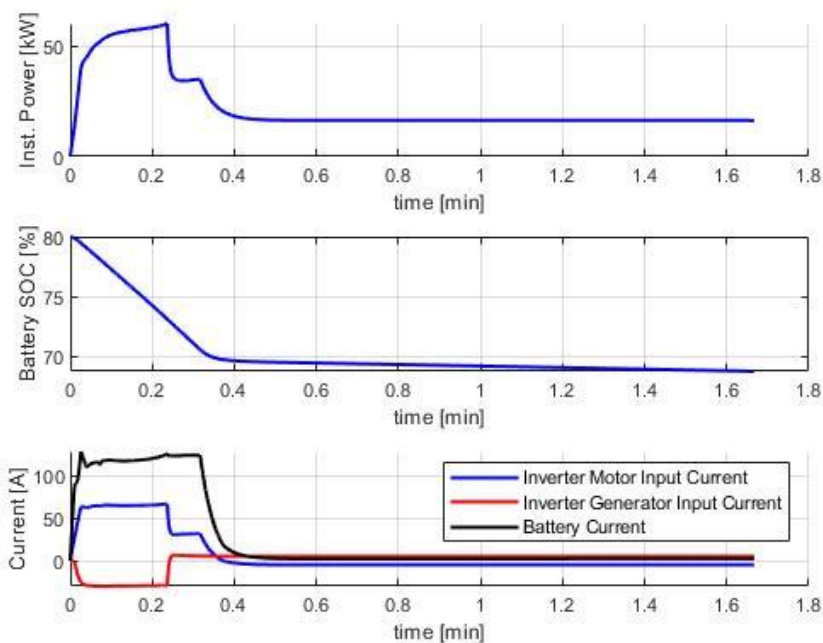


Figura 4.13: Resultats acceleració 0-100 km/h: potència, estat de càrrega (SOC) i intensitats. Font: Pròpia

En la tercera figura, estan representats els parells, revolucions i potències dels tres motors.

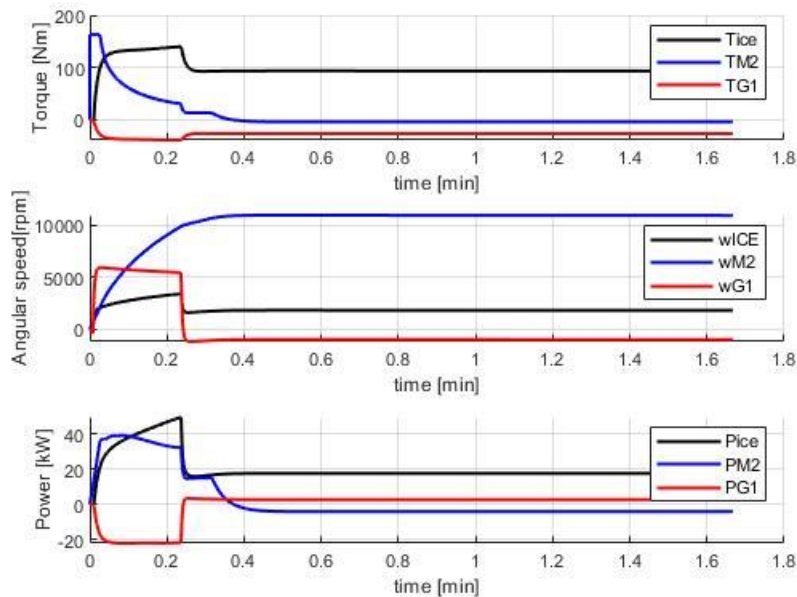


Figura 38: Resultats acceleració 0-100 km/h: parells, velocitats angular i potències. Font: Pròpia

Com es pot veure, durant l'acceleració inicial, el parell de l'ICE segueix la seva corba màxima, i a règim permanent, treballa a un parell òptim. La velocitat del generador depèn de les velocitats del vehicle i la desitjada pel motor de combustió. Inicialment, la potència que absorbeix és màxima, per tal que la potència disponible pel motor elèctric M2 sigui major. En règim permanent, la potència de G1 és pràcticament nul·la, i la de M2 absorbeix una petita part de l'entregada per l'ICE.

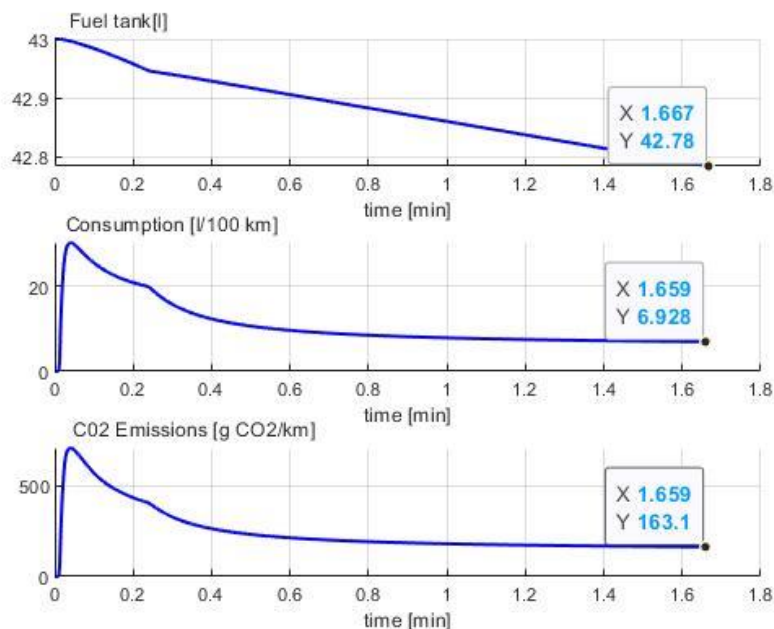


Figura 39: Resultats acceleració 0-100 km/h: litres de combustible, consum i emissions. Font: Pròpia

Respecte al cas anterior el consum i emissions mitjanes són molt més elevats, ja que els temps de simulació és molt menor i la velocitat mitjana és superior.

En aquesta figura podem observar el rati Power-Split. A l'inici de l'acceleració es parteix d'una tracció només elèctrica. Durant la major part de l'acceleració, la tracció és híbrida. A mesura que augmenta la velocitat del cotxe, el motor de combustió interna adquireix més protagonisme. A partir del valor u , el motor M2 actua com a generador.

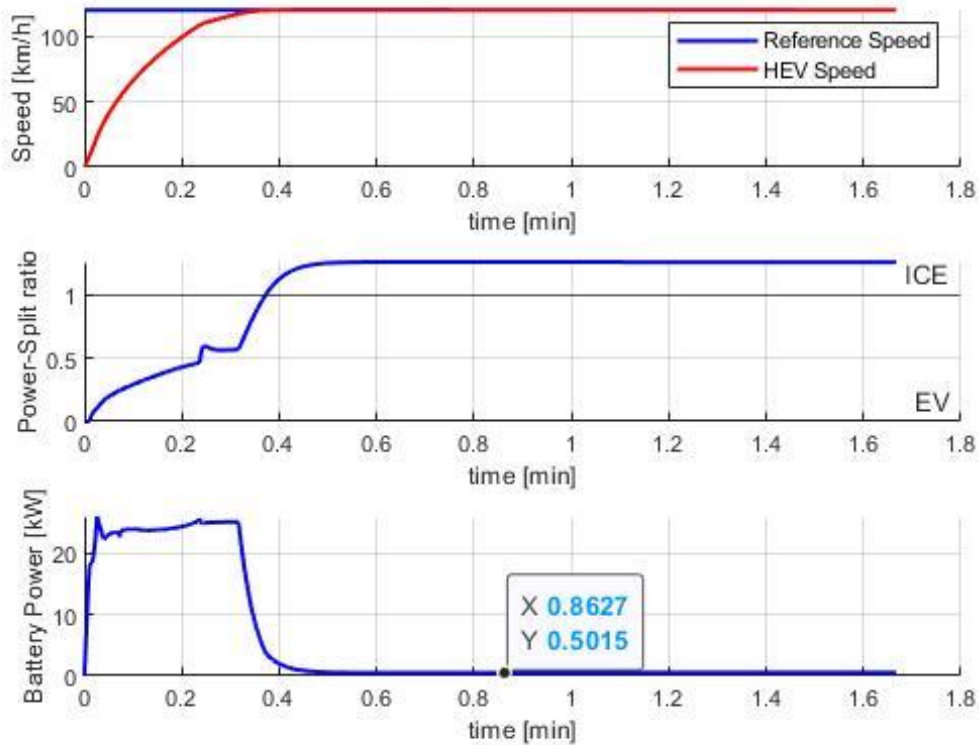


Figura 4.14: Resultats acceleració 0-100 km/h: Power-Split rati, potència de la bateria. Font: Pròpia

Tot i així, com es pot observar la potència de la bateria és positiva. Això és degut a que el generador G1 treballa a un règim de velocitats determinat per tal de que l'ICE pugui desenvolupar un parell òptim, a més de l'estat de càrrega. En aquell instant pren un valor del voltant del 70 %. En règim permanent, el SOC influeix en la velocitat de l'ICE (i del generador) perquè s'estabilitzi al 60 % de la seva capacitat total.

Finalment, en l'última figura estan representats els cicle de conducció per a cada motor, en aquest cas per l'acceleració de 0 a 100 km/h.

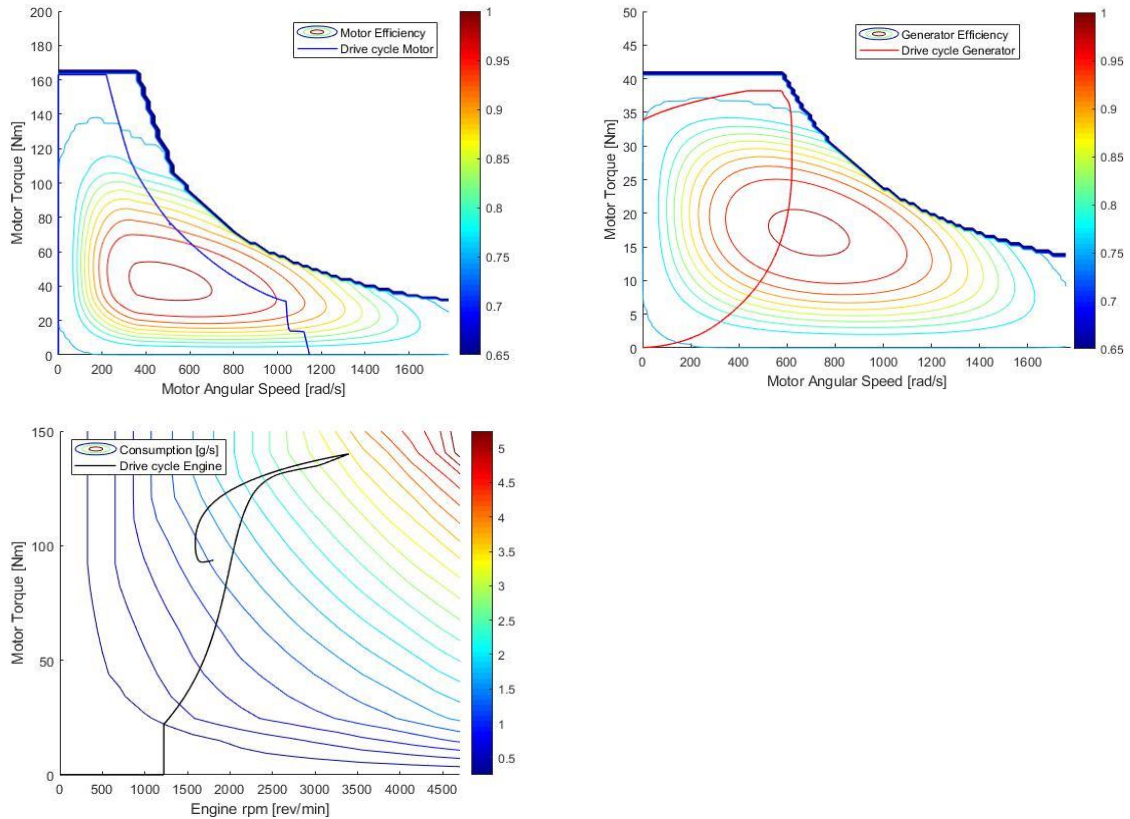


Figura 4.15: Resultats acceleració 0-100 km/h. Punts de treball dels motors. Font: Pròpia

A l'inici de l'acceleració, només s'activa el motor elèctric (en blau), que entrega la seva força màxima. El rotor del generador (en vermell) gira però sense absorbir o cedir potència.

A partir d'aquí, comença a disminuir, ja sigui degut a limitacions físiques o de potència. El motor de combustió interna (en negre), s'activa a partir d'una demanda de potència determinada. Com s'observa, segueix la seva corba de parell màxima. El generador comença a absorbir potència, per alimentar M2 o la bateria. Durant l'acceleració, les dues màquines elèctriques segueixen una corba que s'aproxima a la zona de màxim rendiment.

Un cop el vehicle assoleix el règim permanent de velocitat, la demanda de força de tracció disminueix, i per tant, el parell del motor de combustió pren els valors de la corba òptima, disminuint notablement el consum de combustible.

4.5 Validació del model

Per a validar el model, s'han emprat aquests paràmetres, referents a prestacions i especificacions mediambientals.

	Fitxa tècnica	Simulació
Prestacions		
Temps d'acceleració 0-100 km/h [s]	10,8	12,15
Especificacions mediambientals		
Consum combinat [l/100 km]	4,1-4,7	4,1
Emissions CO2 combinat [g/km]	94-107	99,5

Figura 4.16: Valors fitxa tècnica i obtinguts a partir de la simulació. Font: [10], pròpia

A nivell de prestacions, el temps d'acceleració de 0 a 100 km/h és un bon indicador, atès que l'acceleració té una relació directa amb la força de tracció desenvolupada pel cotxe. El valor obtingut en la simulació és superior al de la fitxa tècnica. Hi ha un error del 12,5%. En part, això és degut a què l'estratègia de control d'aquesta configuració híbrida és força complexa. També hi influeix que els mapes d'eficiència dels motors elèctrics són aproximats perquè no estan publicats pel fabricant. Cal remarcar que les equacions utilitzades per representar els engranatges no contempen les inèrcies, i per tant, els resultats en els estats transitoris són aproximats.

D'altra banda, pel que fa a les especificacions mediambientals, els resultats són força bons perquè es troben compresos en l'interval donat pel fabricant. El consum mitjà es troba en el llindar inferior de l'interval. Com s'han mencionat, la dinàmica del model és aproximada, i per tant, amb un model més complex el consum seria lleugerament superior. Respecte a les emissions mitjanes de diòxid de carboni, el valor de la simulació està situat al mig de l'interval donat.

A partir d'aquests resultats, podem concloure que és vàlida el model de simulació Toyota Prius, tenint en compte un cert marge d'error.

5. Disseny d'una configuració òptima per un turisme híbrid

Partint del model desenvolupat del Toyota Prius, s'ha efectuat el disseny d'una configuració òptima. Aquesta s'ha centrat amb els paràmetres principals de cada component del tren de potència. L'arquitectura híbrida del vehicle és la mateixa. L'objectiu és augmentar l'eficiència del conjunt, mantenint-ne les prestacions respecte al Prius. Només es variaran les potències dels motors elèctrics, i les relacions de transmissions dels engranatges si s'escau.

5.1 Potències del motor de combustió, motor elèctric i generador

Els primers paràmetres a definir, són les potències màximes del drivetrain híbrid, del motor de combustió i de la bateria. S'han definit igual que les del Prius.

$$P_{HEV} = 90 \text{ kW}; P_{ICE} = 72 \text{ kW}; P_{bat} = 27 \text{ kW}$$

Pel que fa a la velocitat màxima, també s'ha considerat de 180 km/h.

A continuació s'ha definit el rati Power-Split, per les potències màximes de la corona i el motor de tracció elèctrica principal. En aquest grau d'híbridació, es fa servir la potència de l'engranatge de sortida del planetari (corona), en comptes de la del motor de combustió interna. Una part de la potència desenvolupada per l'ICE va cap al generador, i per tant, no es podria avaluar bé la potència transmesa en paral·lel que impulsa el vehicle. Cal destacar que aquesta relació és vàlida per quan la demanda de potència és màxima. La potència de la corona, és la diferència entre la desenvolupada per el motor tèrmic i la del generador. S'ha fixat a 0,55 el valor del rati.

$$PSr = \frac{P_{corona}}{P_{corona} + P_{M2}} = \frac{P_{ICE} - P_{G1}}{P_{ICE} - P_{G1} + P_{M2}} = 0,55 \quad (5.1)$$

Aïllant la potència del motor elèctric:

$$P_{M2} = \frac{(P_{ICE} - P_{G1}) \cdot (1 - PSr)}{PSr} \quad (5.2)$$

D'altra banda, aquesta ve delimitada per les potències de la bateria i generador. En aquesta configuració, a diferència de la del Prius, es fa coincidir la potència total que es pot subministrar al motor amb la seva nominal. D'aquesta manera, queda l'equació següent (a partir de l'expressió 3.53).

$$P_{M2max} = \eta_{inv} \cdot \eta_{boost} \cdot \eta_{M2} \left(P_{bat} - \frac{P_{G1}}{\eta_{inv} \cdot \eta_{boost}} \right) \quad (5.3)$$

D'on els rendiments prenen aquests valors. En el cas del motor, s'ha escollit el rendiment mínim.

$$\eta_{inv} = 0,975; \eta_{boost} = 0,98; \eta_{M2minim} = 0,75$$

Combinant les dues equacions anteriors s'ha obtingut l'expressió següent, que permet calcular la potència nominal del generador.

$$P_{G1} = \frac{\frac{P_{ICE} \cdot (1 - PSr)}{PSr} - \eta_{inv} \cdot \eta_{boost} \cdot \eta_{M2} \cdot P_{bat}}{\frac{(1 - PSr)}{PSr} - \eta_{M2}} = 30,5 \text{ kW} \quad (5.4)$$

Un cop obtingut P_{G1} , es procedeix a calcular P_{M2} .

$$P_{M2} = \frac{(P_{ICE} - P_{G1}) \cdot (1 - PSr)}{PSr} = 42 \text{ kW} \quad (5.5)$$

Els motors elèctrics poden entregar el parell màxim fins a una velocitat angular anomenada ω_{base} , punt en què arriben a la seva potència màxima. A partir d'aquí, si augmenta el règim de velocitats disminueix el moment que poden desenvolupar. S'han considerat les mateixes *Prius*. D'aquí s'ha obtingut els parells màxims.

$$T_{M2max} = \frac{P_{M2}}{\omega_{M2base}} = \frac{42 \text{ kW}}{325,2 \text{ rad/s}} = 129,2 \text{ Nm} \quad (5.6)$$

$$T_{G1max} = \frac{P_{M2}}{\omega_{G2base}} = \frac{30,5 \text{ kW}}{602,14 \text{ rad/s}} = 49,8 \text{ Nm} \quad (5.7)$$

Pel que fa al motor de combustió, el parell és el mateix, atès que s'ha mantingut la potència màxima.

	ICE	M2	G1
P [kW]	72	42	30,5
T [Nm]	142,0	129,2	49,8
ω [rad/s]	628,2	1779,9	1779,9

Taula 5: Paràmetres màxims dels motors de la configuració desenvolupada. Font: Pròpia

5.2 Relacions de transmissions

Un cop determinats els paràmetres dels motors, s'ha procedit a calcular les relacions de transmissions dels diversos engranatges que integren el drivetrain.

La velocitat del motor M2 es pot expressar en funció de la del vehicle, ja que tenen una relació directa.

$$\omega_{M2} = \omega_3 \cdot k_2 = \omega_{wheel} \cdot gratio \cdot k_2 = gratio \cdot k_2 \cdot \frac{V_{HEV}}{r_w} \quad (5.8)$$

El producte $gratio \cdot k_2$ ve delimitat per la inequació que es mostra a continuació. Sinó fos així el motor podria arribar a velocitats superiors a la màxima.

$$gratio \cdot k_2 \leq \frac{\omega_{M2max} \cdot r_w}{V_{HEVmax}} = \frac{1779,9 \frac{rad}{s} \cdot 0,315 m}{50 m/s} = 11,2 \quad (5.9)$$

$$\omega_{M2} = ratio \cdot k_2 \cdot \frac{V_{HEV}}{r_w} = gratio \cdot k_2 \cdot \frac{50}{0,315} \quad (5.10)$$

Mitjançant els parells màxims del motor de combustió i del generador es calcula la relació de transmissió del sistema planetari:

$$T_{ICE} = -\frac{T_{G1}}{k_g} = -(1 + i_g) \cdot T_{G1} \quad (5.11)$$

$$i_g = -\frac{T_{ICE}}{T_{G1}} - 1 = -\frac{142,0 Nm}{-49,8 Nm} - 1 = 1,85 \quad (5.12)$$

De la mateixa manera que amb el motor elèctric, s'ha obtingut la limitació imposada per la velocitat del generador. Aquesta depèn de les velocitats ω_{ICE} , V_{HEV} i les relacions de transmissió i_g , k_1 , $gratio$ i r_w .

$$\omega_{G1} = \omega_{ICE} + i_g \left[\omega_{ICE} - \frac{k_1 \cdot gratio}{r_w} \cdot V_{HEV} \right] \quad (5.13)$$

Imposant els valors límits $\omega_{ICE} = 0 rad/s$ i $V_{HEV} = 50 m/s$ ens queda:

$$\omega_{G1} = -i_g \frac{k_1 \cdot gratio}{r_w} \cdot V_{HEV} \quad (5.14)$$

Obtenint la limitació física $gratio \cdot k_1$.

$$gratio \cdot k_1 \leq -\frac{\omega_{G1} \cdot r_w}{V_{HEV} \cdot i_g} = -\frac{-1779,9 \frac{rad}{s} \cdot 0,315 m}{50 \frac{m}{s} \cdot 1,85} = 6,1 \quad (5.15)$$

Per simplificar els càlculs s'escull la transmissió final del Prius $gratio = 3,476$. Pel que fa a la constant del Torque Coupling del motor elèctric M2 també és manté ($k_2 = 3,12$) atès que és lleugerament inferior al límit imposat per la velocitat del vehicle.

L'últim paràmetre per determinar és la constant de la corona k_1 . Com més gran sigui, més força de tracció es transmet a les rodes, i per tant, més acceleració. Per contra, també creix el consum de combustible.

$$k_1 \leq \frac{6,1}{gratio} = \frac{6,1}{3,476} = 1,75 \quad (5.16)$$

A través del model desenvolupat, s'ha pogut comprovar que el valor que s'ajustava millor, tenint en compte prestacions i consums, és $k_1 = 0,85$. A la taula següent es mostren els paràmetres que defineixen les transmissions de la configuració que s'ha desenvolupat.

Transmissions			
Relació de transmissió del planetari i_g	1,85	Relació de transmissió $gratio$	3,476
Relació de transmissió k_1	0,85	Radi del pneumàtic (m)	0,315
Relació de transmissió k_2	3,12		

Taula 6: Paràmetres de la transmissió per la configuració desenvolupada. Font: Pròpia

5.3 Resultats de la configuració òptima

Com en la validació del model, s'avaluarà el temps d'acceleració per una consigna de velocitat constant; i els consums i emissions del cicle WLTP 3b. Els resultats obtinguts són força similars als obtinguts en la simulació del Toyota Prius.

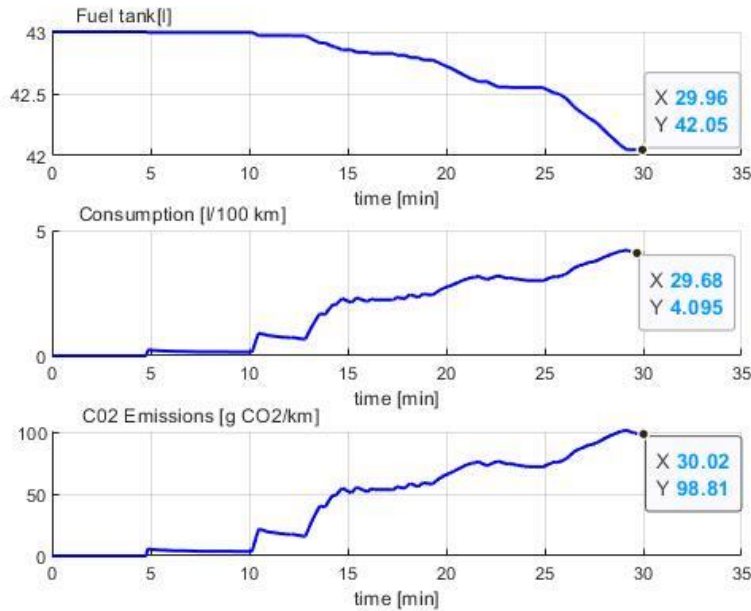


Figura 5.1: Resultats cicle WLTP 3b configuració desenvolupada: litres de combustible, consum i emissions. Font: Pròpia

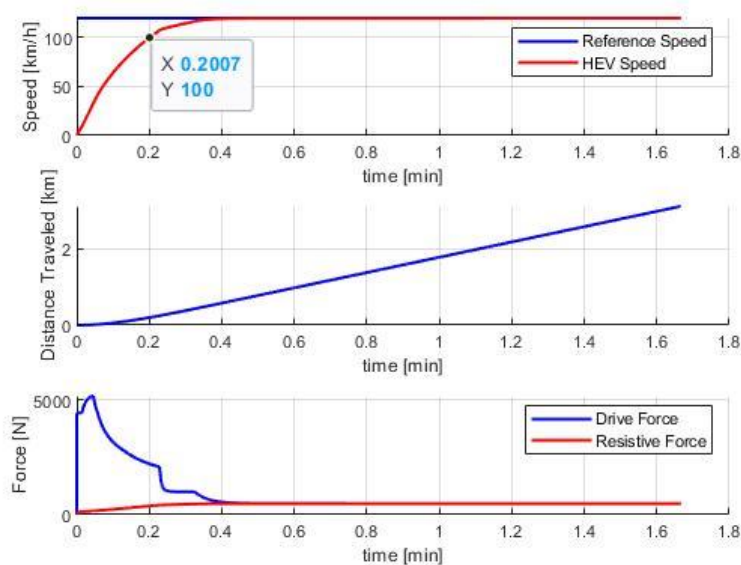


Figura 5.2: Resultats acceleració 0-100 km/h configuració desenvolupada: velocitats, distància recorreguda i forces. Font: Pròpia

En la taula es mostren els valors obtinguts. Tant pel que fa a prestacions com especificacions mediambientals són pràcticament iguals, lleugerament inferiors als de la validació del model del Prius.

	Fitxa tècnica	Simulació Prius	Simulació configuració desenvolupada
Prestacions			
Temps d'acceleració 0-100 km/h [s]	10,8	12,15	12,04
Especificacions mediambientals			
Consum combinat [l/100 km]	4,1-4,7	4,1	4,1
Emissions CO2 combinat [g/km]	94-107	99,5	98,8

Figura 5.3: Resultats obtinguts amb la simulació. Font: Pròpia

Tot i així, el disseny d'aquesta configuració suposa una petita millora, atès que s'han mantingut els requeriments a nivell d'especificacions, reduint la suma de les potències nominals de les màquines elèctriques.

6. Resum del pressupost

En aquest capítol s'exposa el resum del pressupost derivat del projecte de desenvolupament d'un model de simulació del tren de potència d'un vehicle híbrid. Com s'observa en la taula següent, només està constituït pel cost de programari utilitzat i els costos d'enginyeria.

Concepte	Cost total
Cost de programari	1622,8 €
Cost d'enginyeria	3600,0 €
Total	5222,8 €

Taula 7: Pressupost total del projecte. Font: Pròpia

Els programes utilitzats en el treball són el MATLAB, Simulink, State-Flow, Word i Excel. Pel que fa als costos d'enginyeria, s'ha considerat la dedicació del treball, estimada en 300 hores. El cost total del projecte és de 5222,8 €.



7. Anàlisi de les implicacions ambientals

El model de simulació desenvolupat permet analitzar el consum de combustible i les emissions de diòxid de carboni del Toyota Prius. En les simulacions de la validació del model, s'ha pogut comprovar que els valors obtinguts són coherents i s'ajusten als de la fitxa tècnica.

Mitjançant el model, es podria realitzar un estudi o avantprojecte per reduir el consum i emissions d'un vehicle híbrid amb la mateixa configuració de tren de potència. Variant els paràmetres d'un component determinat, de forma similar al que s'ha realitzat en el capítol 5 del treball, es podria analitzar l'impacte mediambiental que comporta el component en qüestió i optimitzar-lo. De la mateixa manera, el model permet realitzar simulacions sobre diferents condicions de conducció, com per exemple un cicle de conducció urbà o extra urbà. Això permetria optimitzar el vehicle segons el seu ús.

Cal remarcar, que els mapes de consums i emissions utilitzats són aproximats, i que per obtenir uns resultats més precisos s'haurien d'emprar mapes obtinguts en un laboratori.

8. Línies de treball futures

Com s'ha mencionat anteriorment, el model de simulació està constituït per quatre grans blocs que són el bloc de control, el tren de potència (vehicle components), el bloc d'entorn i el bloc d'acceleració. El projecte s'ha enfocat en el desenvolupament del segon.

D'aquests, es poden fer modificacions o ampliacions rellevants en el d'entorn i tren de potència.

Pel que fa al bloc de l'entorn, es podria profunditzar amb perfils altimètrics i condicions variables de la carretera, així com utilitzar equacions més complexes de les forces resistents a l'avanç del cotxe. També es podria convertir el model en bidimensional, considerant les inèrcies i longituds de l'automòbil.

A continuació es detallen les propostes de millora pels components o subsistemes que integren el bloc del tren de potència. En algunes d'aquestes propostes és valorable utilitzar llibreries ja existents de MATLAB-Simulink, per tal d'optimitzar el temps de simulació.

- Model del motor de combustió. En aquest projecte s'ha realitzat un model a partir d'una taula de dades. Aquest es podria millorar, tenint en compte les inèrcies del motor i els quatre estats de funcionament d'un motor tèrmic: l'engegada, en funcionament, en ralenti i apagat.
- Sistema de transmissions. El bloc desenvolupat es podria millorar utilitzant equacions diferencials i tenint en compte les inèrcies dels engranatges. D'aquesta manera, el model seria molt més precís a nivell dinàmic.
- Sistema elèctric. Dels components que el formen, el més interessant de cara a millorar-lo és el model de la bateria. Actualment, tant pels vehicles elèctrics com híbrids és un dels components més cars, i per tant, dels que convé optimitzar-lo més. Tant dels motors com dels convertidors també es podrien fer blocs més complexos.
- Sistema de control. El fet que hi hagi dos graus de llibertat en el control del drivetrain, fa que aquest sigui força més complex respecte a un model de vehicle elèctric o convencional. Aquest es podria millorar utilitzant un algoritme o estratègia de control més complexa, especialment si es poden realitzar proves del vehicle en un laboratori.

9. Conclusions

En aquest projecte s'han realitzat els objectius proposats, d'acord amb l'abast i requeriments del treball.

El turisme híbrid escollit pel model de simulació ha estat el Toyota Prius, atès que la configuració del seu tren de potència és en paral·lel. Inicialment, es va partir d'un model de vehicle completament elèctric. Es va estudiar els tipus d'arquitectures híbrides i els components que en formen part, per tal de poder determinar els blocs a afegir o modificar respecte el model inicial.

Seguidament, es van estudiar el funcionament dels components a nivell matemàtic, per tal de poder desenvolupar els diagrames de blocs de cada un d'ells, i les relacions entre ells. Els blocs que s'han realitzat de forma íntegra han estat el sistema de control, el sistema d'engranatges i el submodel que representa el dipòsit de combustible i emissions. També s'han adaptat els blocs del motor de combustió interna, del convertidor, i del generador i el seu inversor. De la mateixa manera, s'han modificat les variables d'entrada i de sortida necessàries. Cal destacar, que els components del model de simulació s'han dissenyat o adaptat sense utilitzar llibreries amb el programa MATLAB-Simulink, a excepció dels mapes dels motors o del control lògic del vehicle.

Els resultats obtinguts en les simulacions, per un cicle de conducció o velocitat constant, són coherents respecte l'abast del projecte, per la qual cosa s'ha pogut validar el model. A nivell d'acceleració (de 0 a 100 km/h) l'error és d'un 12,5%; i pel que fa a consum i emissions (seguint el cicle WLTP 3b), els valors obtinguts amb la simulació estan dins del rang especificat pel fabricant. Per tant, es pot afirmar que els resultats són més precisos a nivell energètic que a nivell dinàmic.

En el capítol de disseny d'una configuració òptima per un vehicle híbrid, s'han modificat els valors de les potències dels motors i les relacions de transmissions respecte els paràmetres del Toyota Prius, per tal de millorar els resultats de les simulacions. Aquests han millorat lleugerament, tot i disminuir la potència nominal del motor elèctric.

A nivell temporal, cal remarcar que el projecte s'ha pogut realitzar amb les hores previstes i dins del termini establert, presentant els documents requerits abans de la data d'entrega límit.

10. Bibliografia

- [1] "Design and Simulation of Split Parallel Hybrid Electric Vehicle - Inpressco." <http://inpressco.com/design-and-simulation-of-split-parallel-hybrid-electric-vehicle/> (accessed Jun. 10, 2020).
- [2] T. A. Burress *et al.*, "Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System," Oak Ridge, TN (United States), Mar. 2011. doi: 10.2172/1007833.
- [3] "Emission Test Cycles: WLTC." <https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php> (accessed Jun. 20, 2020).
- [4] "Internal combustion engine with throttle and rotational inertia and time lag - MATLAB." <https://www.mathworks.com/help/phymod/sdl/ref/genericengine.html> (accessed Jun. 20, 2020).
- [5] "Spark-ignition engine model using lookup tables - Simulink." <https://www.mathworks.com/help/autoblks/ref/mappedsiengine.html> (accessed Jun. 20, 2020).
- [6] S. Onori, L. Serrao, and G. Rizzoni, "Hybrid electric vehicles: Energy management strategies," in *SpringerBriefs in Control, Automation and Robotics*, no. 9781447167792, Springer Publishing Company, 2016, pp. 1–112.
- [7] M. Ehsani *et al.*, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, Third Edition*. CRC Press, 2018.
- [8] H. Kim, T. Barhoumi, and D. Kum, "Comprehensive Design Methodology of Compound-Split Hybrid Electric Vehicles: Introduction of the Compound Lever as a Design Tool," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 84744–84756, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2925146.
- [9] N. Kim, A. Rousseau, and E. Rask, "Autonomie model validation with test data for 2010 Toyota Prius," in *SAE Technical Papers*, Apr. 2012, doi: 10.4271/2012-01-1040.
- [10] "Bienvenido a Toyota España | Vehículos Toyota." <https://www.toyota.es/> (accessed Jun. 10, 2020).
- [11] N. Kawamoto, K. Naiki, T. Kawai, T. Shikida, and M. Tomatsuri, "Development of new 1.8-liter engine for hybrid vehicles," in *SAE Technical Papers*, Apr. 2009, doi: 10.4271/2009-01-1061.
- [12] "ANFAC." <https://anfacs.com/> (accessed Jun. 10, 2020).
- [13] S. Moura, "PLUG-IN HYBRID ELECTRIC VEHICLE POWER MANAGEMENT: OPTIMAL CONTROL AND BATTERY SIZING," Jun. 2020.



- [14] I. Pielecha, W. Cieslik, P. Borowski, J. Czajka, and W. Bueschke, "The development of combustion engines for hybrid drive systems," *Combust. Engines*, vol. 158, pp. 23–35, 2014.
- [15] "Prius synergy | Search Autoparts."
<https://www.searchautoparts.com/motorage/maintenance-repair/prius-synergy>
(accessed Jun. 20, 2020).

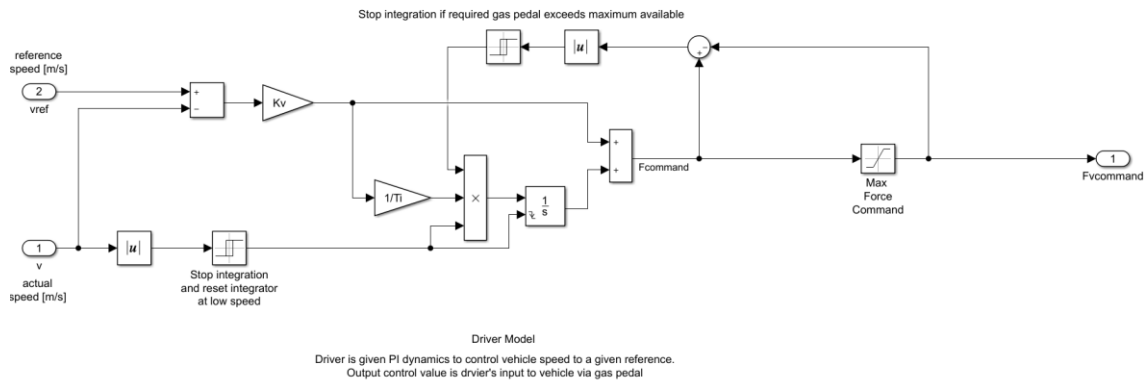


Figura A. 2: Bloc del control del vehicle. Font: Pròpia

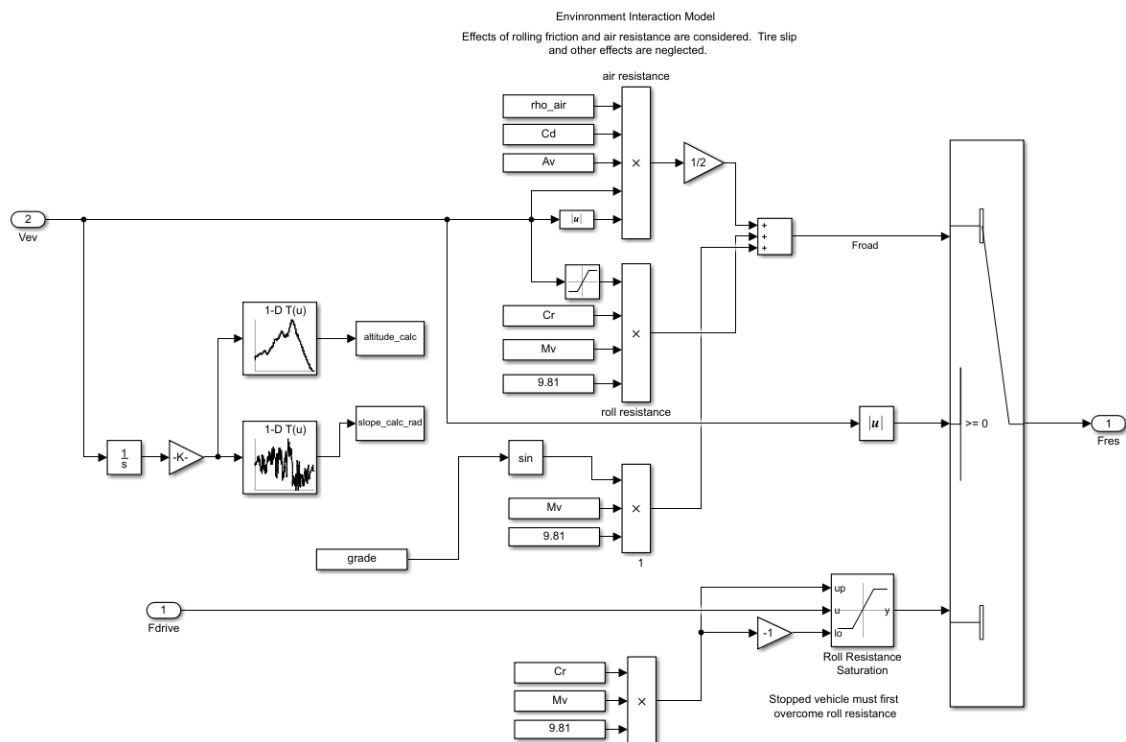


Figura A. 3: Bloc d'entorn. Font: Pròpia

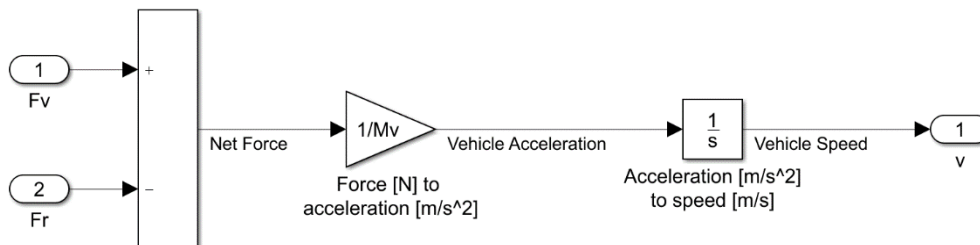
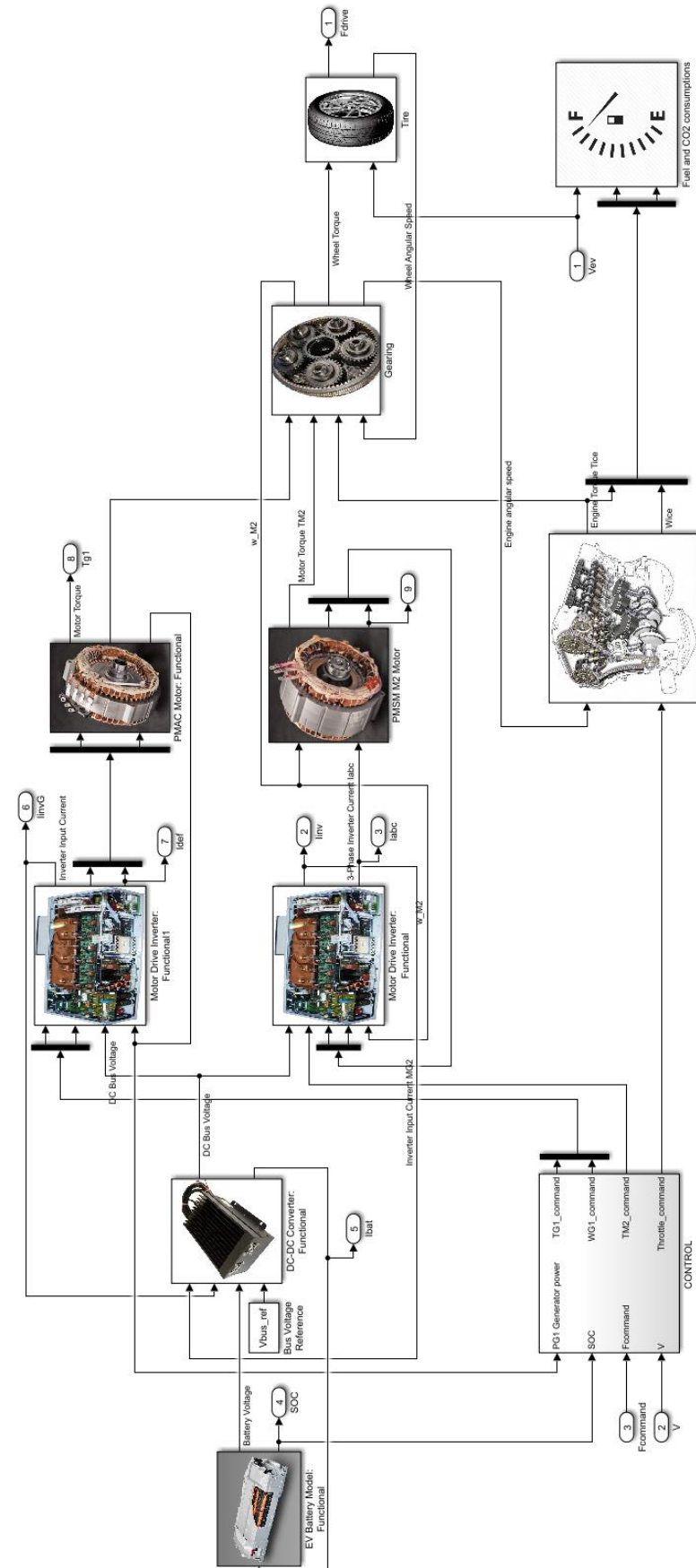


Figura A. 4: Bloc d'acceleració. Font: Pròpia



Split-Parallel Hybrid Electric Vehicle drivetrain-Toyota Prius

Model for a HEV vehicle system during driving cycle. Model consists of Battery, DC-DC converter, two inverters, 2 PMASM motors/generators (M2 and G1), gearings, and vehicle tires

Figura A. 5: Bloc del tren de potència. Font: Pròpia

A.1 Diagrames de blocs dels components del tren de potència

A.1.1 Blocs del sistema tèrmic

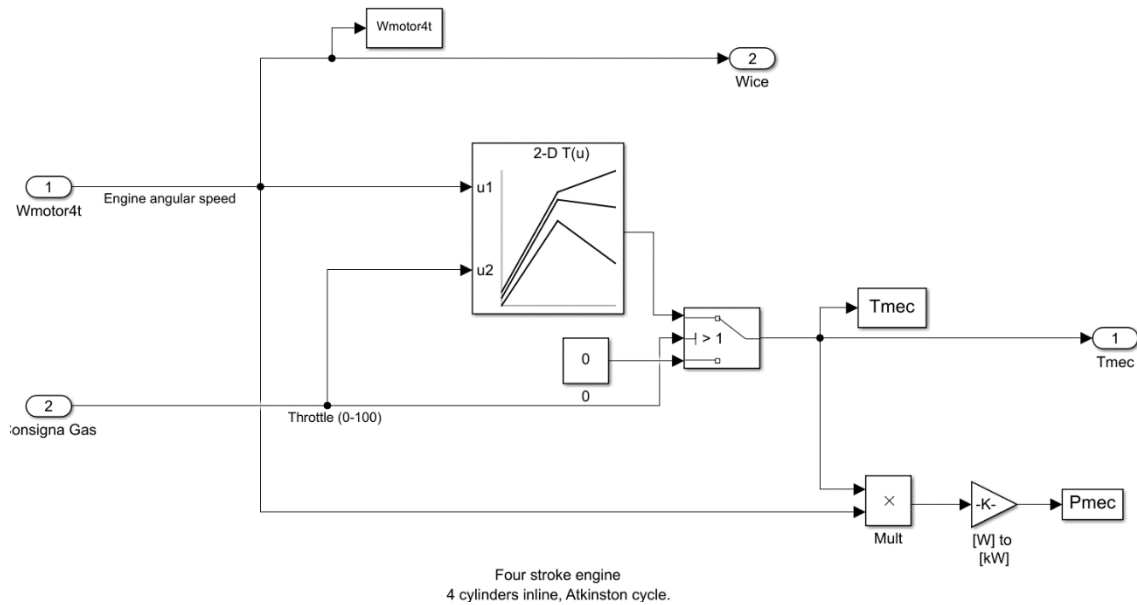


Figura A. 6: Bloc del motor de combustió interna. Font: Pròpia

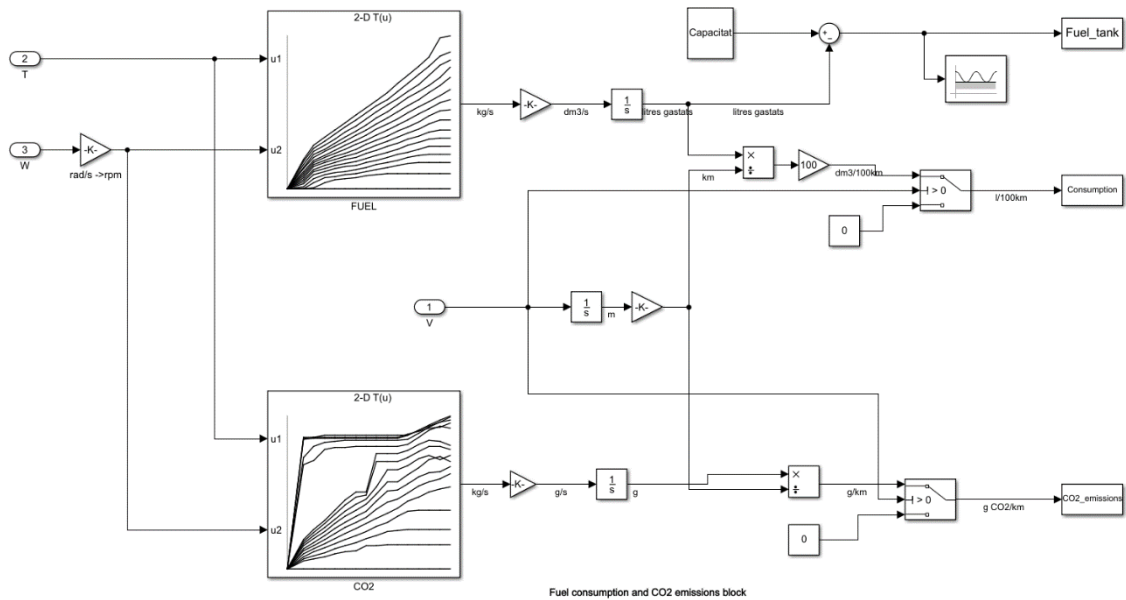


Figura A. 7: Bloc del dipòsit de combustible i emissions. Font: Pròpia.

A.1.2 Blocs del sistema elèctric

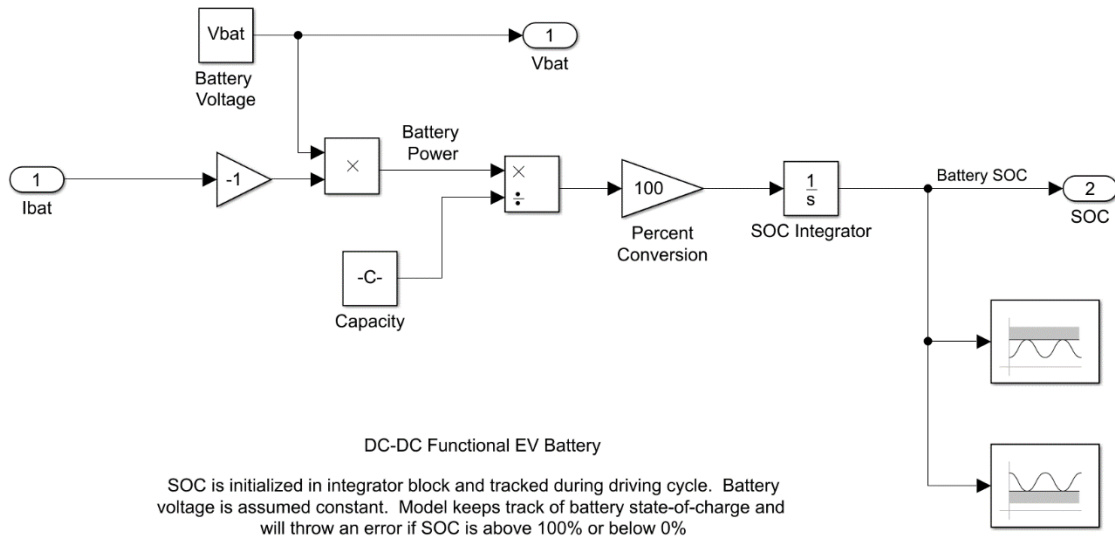


Figura A. 8: Bloc de la bateria elèctrica. Font: Pròpia

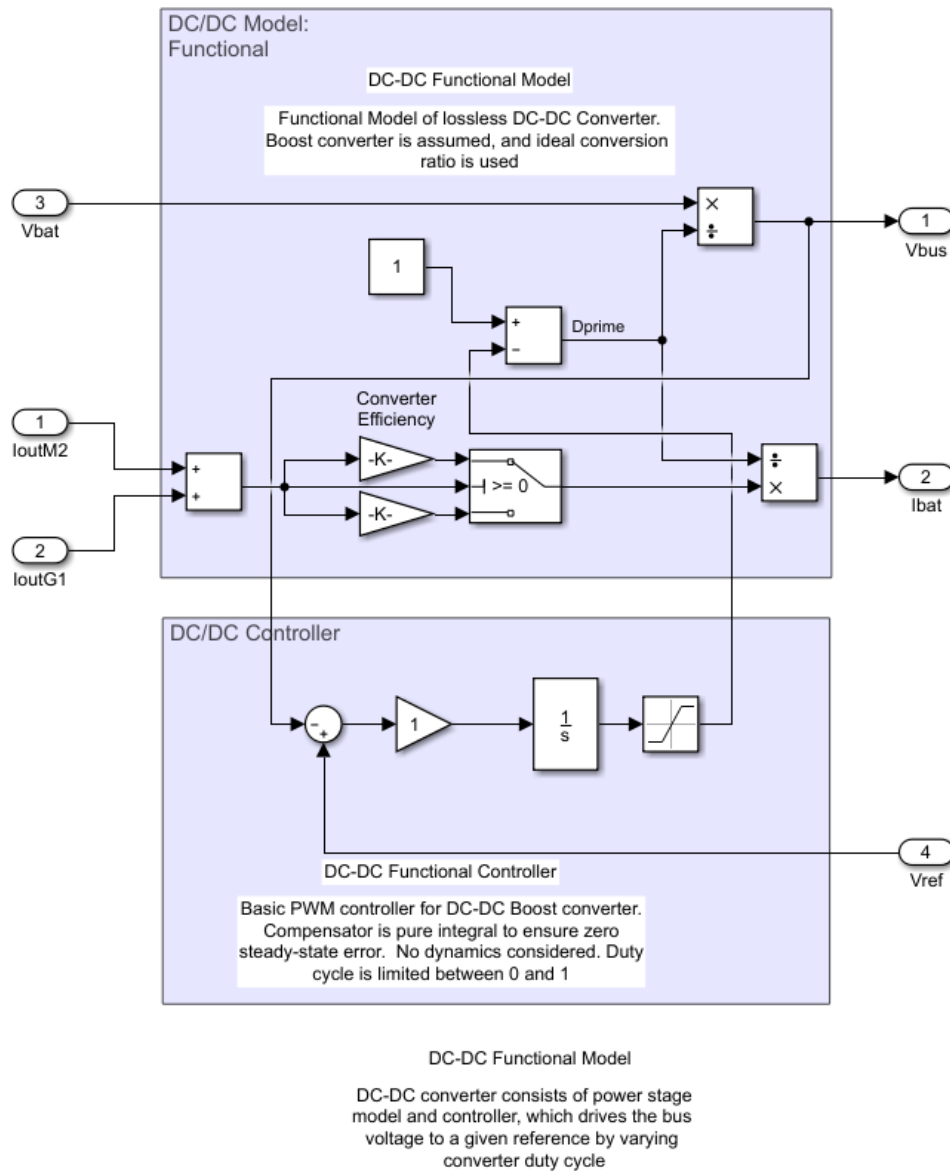


Figura A. 9: Bloc del convertidor DC/DC. Font: Pròpia

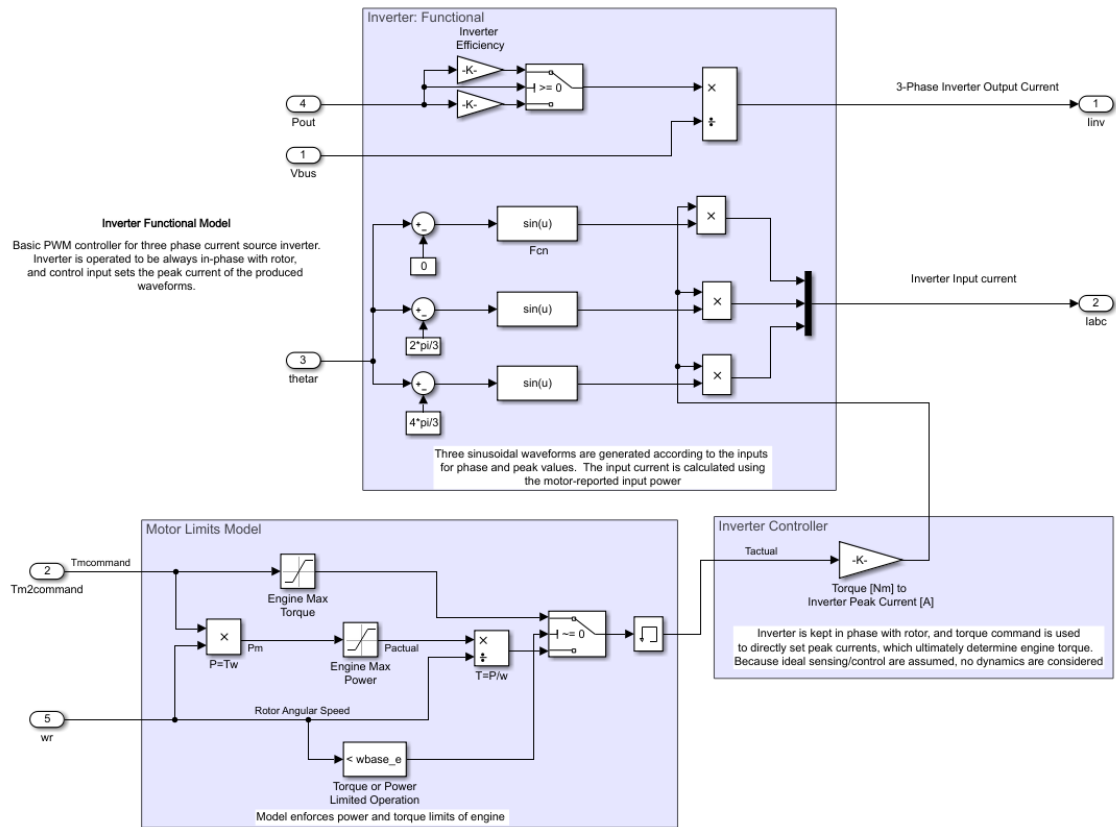


Figura A. 10: Bloc de l'inversor del motor M2. Font: Pròpia

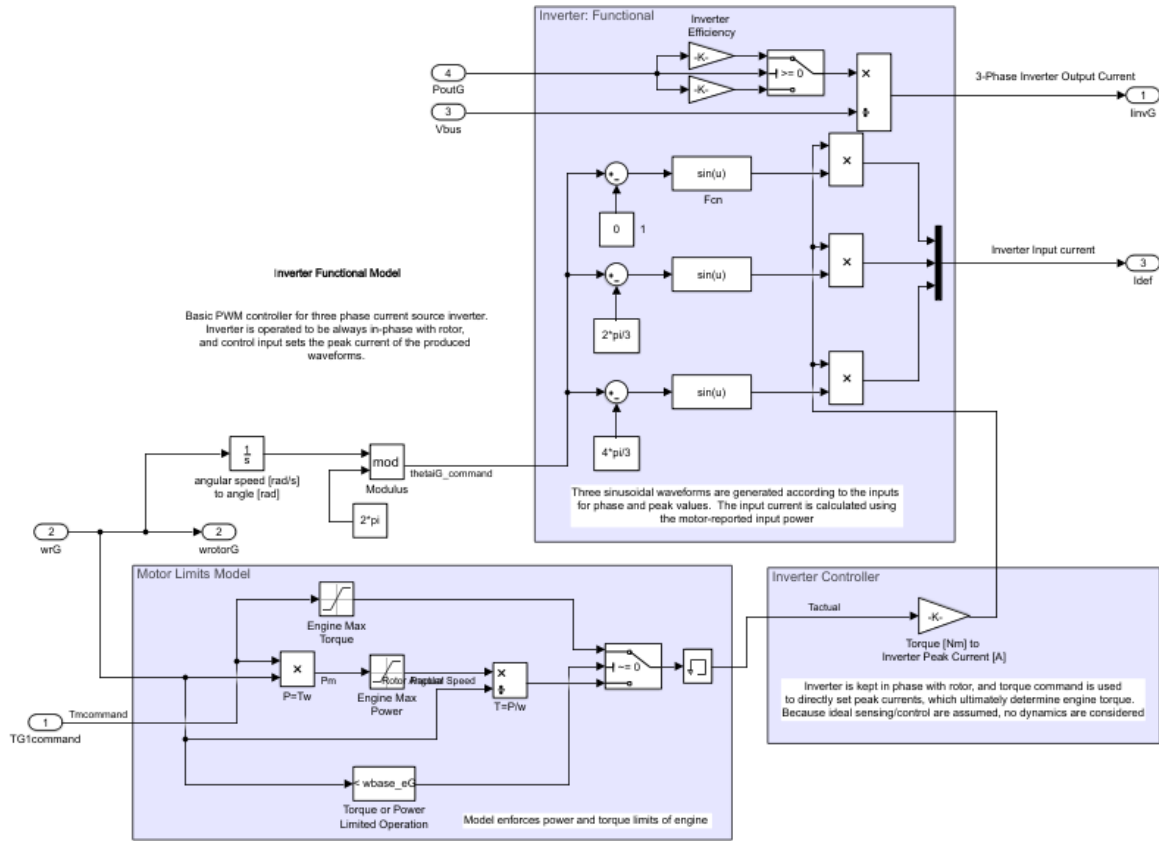
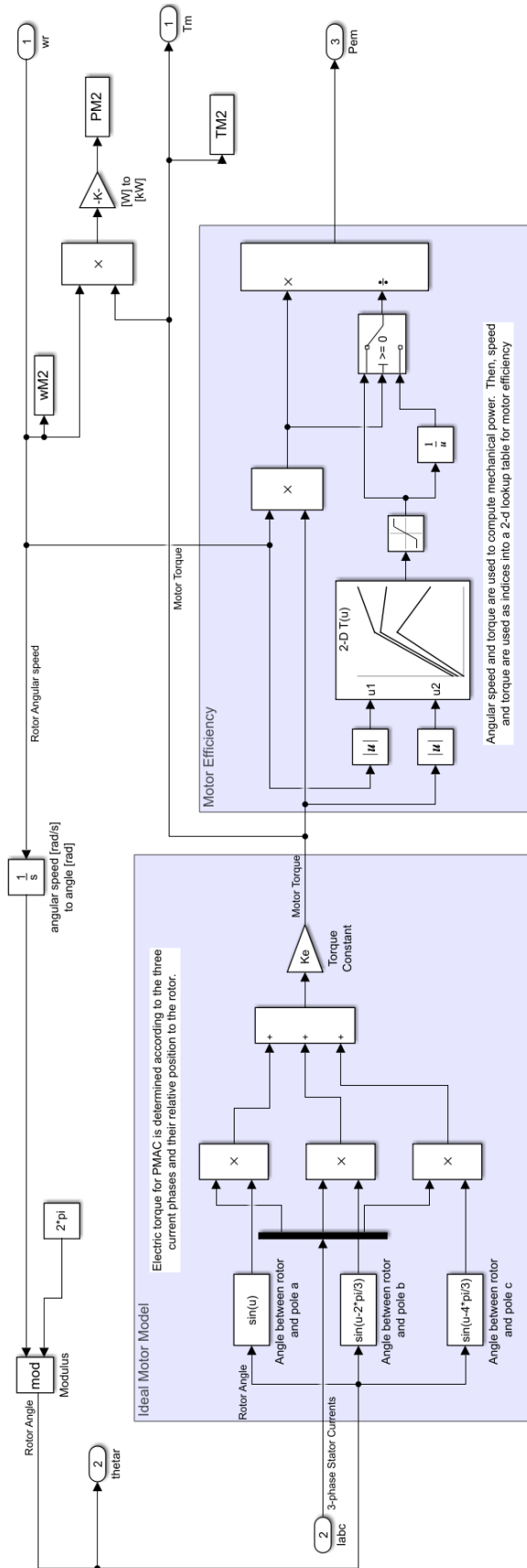


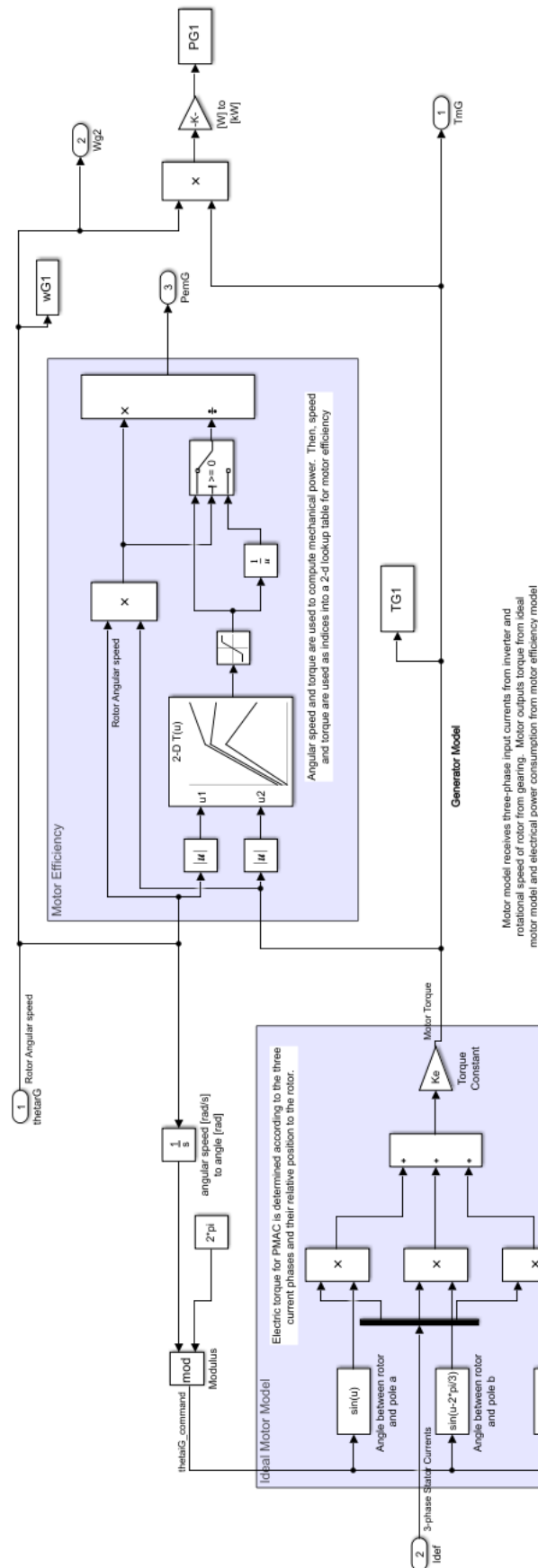
Figura A. 11: Bloc de l'inversor del generador G1. Font: Pròpia



PMAC Motor Model

Motor model receives three-phase input currents from inverter and rotational speed of rotor from gearing. Motor outputs torque from ideal motor model and electrical power consumption from motor efficiency model.

Figura A. 12: Bloc del motor elèctric M2. Font: Pròpia



Motor model receives three-phase input currents from inverter and rotational speed of rotor from gearing. Motor outputs torque from ideal motor model and electrical power consumption from motor efficiency model

Figura A. 13: Bloc del generador elèctric G1. Font: Pròpia

A.1.3 Blocs de les transmissions

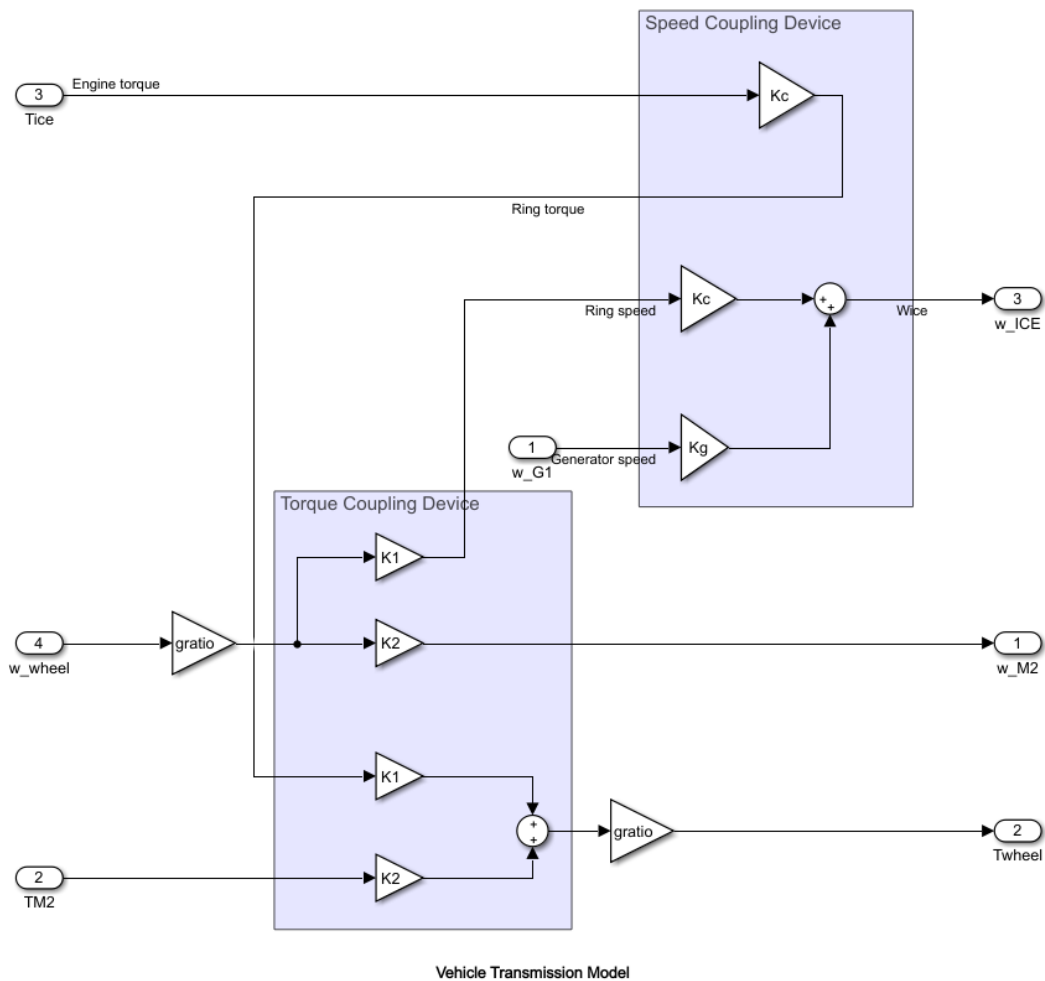
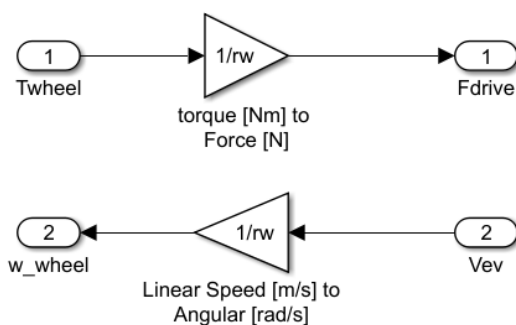


Figura A. 14: Bloc del sistema d'engranatges. Font: Pròpia



Vehicle Tire Model

Model of tire used to convert from rotational to linear mechanics.
Slip and other higher order effects are not considered.

Figura A. 15: Bloc del pneumàtic. Font: Pròpia

A.1.4 Blocs del sistema de control

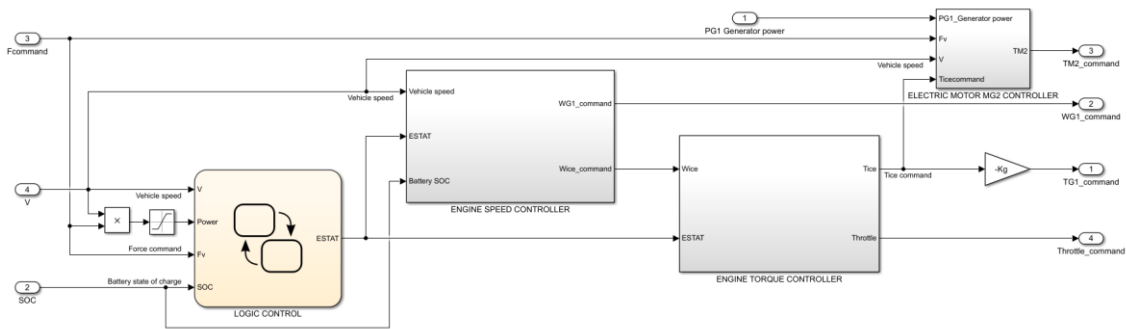


Figura A. 16: Bloc de control. Font: Pròpia

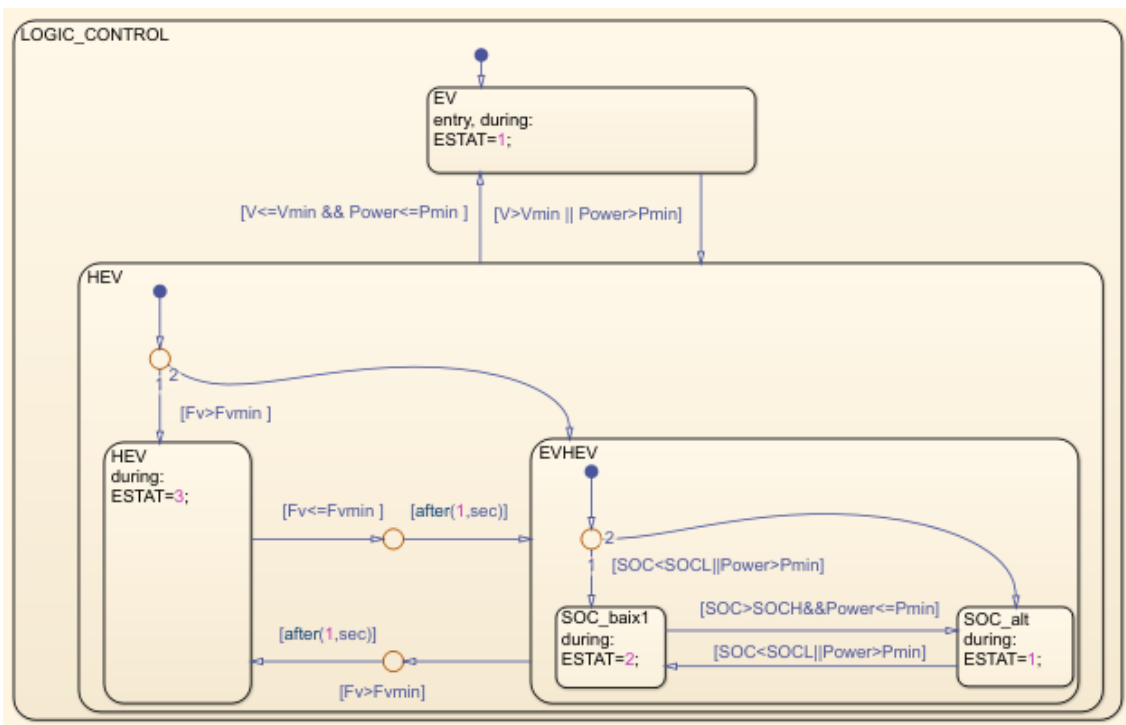


Figura A. 17: Bloc del control lògic. Font: Pròpia

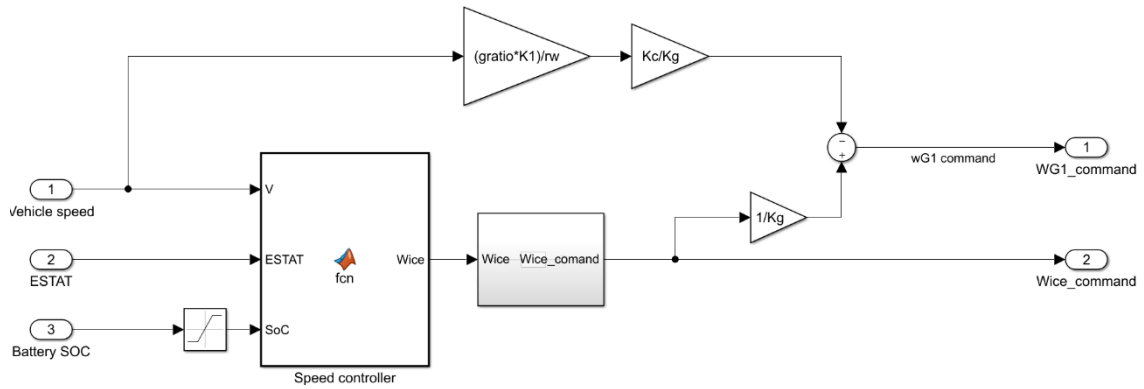


Figura A. 18: Bloc del controlador de velocitat. Font: Pròpia

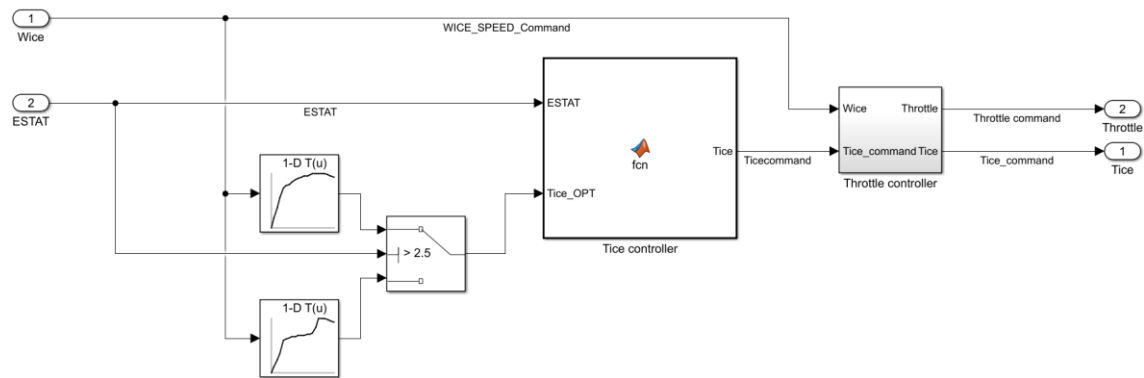


Figura A. 19: Bloc del controlador de parell. Font: Pròpia

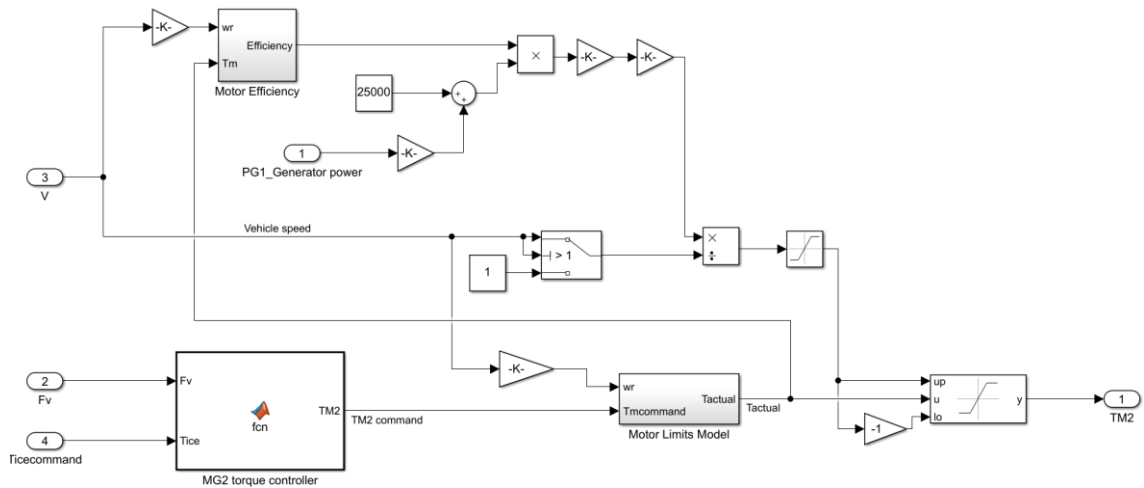


Figura A. 20: Bloc del limitador de parell del motor M2. Font: Pròpia

Annex B Codi utilitzat en el model

A continuació, es mostra el codi de MATLAB que defineix el model de Simulink, així com els codis utilitzats en els blocs Matlab Function dels blocs del sistema de control.

B.1 Definió de paràmetres

```

%% load driving cycles
clear all;
close all;
thisPath = strrep(mfilename('fullpath'),mfilename,'');
addpath([thisPath 'images']);
addpath([thisPath 'drivingCycles']);
load wltp_class_1;           % simulation time: 1023
load wltp_class_2;           % simulation time: 1801
load wltp_class_3_a;         % simulation time: 1478
load wltp_class_3_b;         % simulation time: 1801
load eudc;                   % simulation time: 1191

%% Simulation Parameters
tstop = 1200;                % simulation run time [sec]
tstep = .01;                 % maximum simulation step [sec]

%% Driver model parameters
Ti =50;                      % integral time constant
Kv = 650;                    % proportional gain

%% Transmission and Wheel Parameters
gratio = 3.476;              % Final transmission reduction ratio
ig=2.6;                      % Planetary reduction ratio
Kc=ig/(1+ig);                % Planetary ring constant
Kg=1/(1+ig);                 % Planetary sun constant
K1= 0.82;                    %Constant 1 torque coupling
K2= 3.12;                    %Constant 2 torque coupling
rw = 0.315;                  % wheel radius [m]

%% Control parameters
Vmin=9.72;                   % Control low speed [m/s]
Wmin=209.44;                 % Minimum angular speed of the
ENGINE[rad/s]
SOCH=65;                     % Higher limit SOC
SOCL=55;                     % Lower limit SOC
Fvmin=2500;                  % Force transition limit [N]
Pmin=12500;                  % Power transition limit [W]
load W_T;                    % Engine optimal torque curve
load maxpowerW_T;           % Engine maximum torque curve
% Control Wice
a=0.0125;
b=0.75;
c=23.61;
d=125.66;
e=83.78;
f=5.39;
g=7.88;
h=188.5;
aa=2.74;
bb=183.24;
cc=5.76;

```

```

%% Internal Combustion Engine Parameters
%ICE parameters
Pmax = 72e3; % Maximum power [W]
Tice_max=142; % Engine maximum torque[Nm]
T0 = 20; % Engine minimum torque[Nm]
rpmmax= 5750; % Engine maximum speed [rpm]
rpmmin= 1000; % Engine minimum speed [rpm]
gasmax= 100; % Maximum throttle command (%)
gasmin= 0.05; % Minimum throttle command (%)

% PI ENGINE
K_w=1;
T_w=0.2;
% Engine equations
rpmmax = rpmmax*pi/30; % rpm to rad/s
rpmmin = rpmmin*pi/30; % rpm to rad/s
T1 = 0.87*Pmax/rpmmax; % Constant 1 torque
T2 = 1.13*Pmax/(rpmmax^2); % Constant 2 torque
T3 = -Pmax/rpmmax^3; % Constant 3 torque
gas = (gasmin:(gasmax-gasmin)/100:gasmax);
rpm = (rpmmin:(rpmmax-rpmmin)/100:rpmmax);
rpm=rpm';

% Engine matrix
m=zeros(101,101);
for i=1:length(rpm)
    Tpc=T1+T2*rpm(i)+T3*rpm(i)^2;
    for j=1:length(gas)
        s=1-((length(gas)-j)/length(gas));
        m(i,j)= Tpc*s +T0*(1-s);
    end
end

% Engine maximum torque curve
m_100=zeros(1,101);
for q=1:length(rpm)
    m_100(q)=T1+T2*rpm(q)+T3*rpm(q)^2;
end

% Engine minimum torque curve
m_0=zeros(1,101)
for l=1:length(rpm)
    Tpc=T1+T2*rpm(l)+T3*rpm(l)^2;
    s=1-((length(gas)-1)/length(gas));
    m_0(l)= Tpc*s +T0*(1-s);
end

%% Fuel tank
Capacitat=43; % Intial fuel tank capacity [l]
densitat=680; % Gasoline density [g/dm3]
load TAULES_ice; % Fuel and CO2 tables
load torque; % Torque and speed vectors

%% DC-DC Converter Parameters
eta_DC = 0.98; % DC-DC Converter Efficiency (constant)
Vbus_ref = 650; % DC Bus Voltage Reference (constant)
[V]

%% Inverter Parameters
eta_inv = 0.975; % Inverter Efficiency (constant)0.95

```



```
%% Battery Model Parameters
Capacity = 1.31e3*60*60; % Battery pack capacity [J] = Wh*60*60
SOC_0 =80; % Initial battery state of charge [%]
Vbat =201.6; % Battery pack nominal voltage [V]

%% Electric Motor MG2 Parameters
load MG2Eff; % Electric Motor Efficiency Data
Ke = 0.407; % Torque Constant [Nm/A]
Pe_max = 53e3; % Maximum Motor Power [W]
wbase_e=325.15; % Angular Base Speed of electric motor
[rad/s]
Te_max = Pe_max/wbase_e; % Maximum motor torque [Nm]

%% Electric Generator MG1 Parameters
load MG1Eff; % Electric Motor Efficiency Data
Pe_maxG = 23e3; % Maximum Motor Power [W]
wbase_eG=602.14; % Angular Base Speed of electric motor
[rad/s]
Te_maxG = Pe_maxG/wbase_eG; % Maximum motor torque [Nm]

%% Vehicle physical parameters
Fv_max = ((Te_max*K2+Tice_max*(K1*ig/(1+ig)))*(gratio/rw)); % Maximum
vehicle tractive force [N]
PTmax=90000; % Maximum vehicle power [W]
Mv = 1400; % Vehicle curb weight + 250 kg passenger
and cargo
Cd = 0.24; % Coefficient of Drag
Cr = 0.01; % Coefficient of Friction
Av = 2.19; % Front area [m^2]
rho_air = 1.204; % Air density [kg/m^3]
grade=0; % Grade of the road [%]
grade=atan(grade/100); % Grade in radians
load hillclimb; % Hostalets Balanya-Turo Home-Sant
Celoni tstop=4500s % hillclimb contains grade, altitude as
a function of distance
```


B.2 Matlab function del controlador de velocitat

```
function Wice = fcn(V,ESTAT,SoC,a, b, c, d, e, f, g, h, aa, bb, cc)
%#codegen
if (ESTAT==1)
    Wice=0;
elseif (ESTAT==2)
    Pwr2=-a*SoC+b;
    if (V<c)
        Wice=d+Pwr2*(e+f*V);
    else
        Wice=d+g*(V-c)+5*Pwr2*(h-aa*(V-c));
    end
else
    Wice=bb+cc*V;
end
end
```

B.3 Matlab function del controlador de parell

```
function Tice = fcn(ESTAT,Tice_OPT)
if (ESTAT==1)
    Tice=0;
else
    Tice=Tice_OPT;
end
```