Resum

El projecte consisteix en la realització d'un programa de càlcul amb Matlab i la descripció, explicació i justificació del disseny i dels elements que formen el tren de potència del CAT 07e, el tercer vehicle elèctric fet a l'ETSEIB, per participar a la competició Formula Student. Es tracta d'una competició d'estudiants universitaris de tot el món, en modalitat elèctrica o de combustió, en les que es realitzen diferents proves estàtiques i dinàmiques. S'estudia el conjunt elèctric per capítols en el nucli:

En el primer, s'analitza la part final del sistema, el que mou la càrrega total a través de la seva unió a les rodes, mitjançant els diferents elements mecànics, els motors. Es descriu el tipus emprat, dins del ventall d'opcions disponibles en màquines elèctriques i es justifiquen les característiques que el fan una correcta selecció. A més, s'analitza la integració en el vehicle i s'introdueixen càlculs i valors significatius i necessaris per al disseny del vehicle, els quals són ampliats a l'***Annex D***. A l'***Annex C***, es modelitza el motor mitjançant equacions.

En el segon, es descriu una part que per Normativa de competició és necessària, els convertidors DC/AC. S'expliquen els inversors tenint en compte les parts que el formen, les característiques i funcions de cada una i quins punts es destaquen en el disseny. A més, s'introdueixen parts del programa emprat i les proteccions dels onduladors. Això va unit al tercer capítol, on es descriu i presenta el tipus de control utilitzat pel funcionament i alguns resultats de proves i simulacions fetes.

En el quart, es presenta el tipus de bateria usada i el dimensionament necessari per a les proves a realitzar, fet que afecta a la configuració de les cel·les i als càlculs a fer. Es defineixen i comparen les característiques del tipus escollit vers altres i es descriuen els elements i circuits integrats al vehicle per a bateries, exigits per Normativa, que garanteixen un correcte funcionament i seguretat.

En el cinquè capítol del nucli, s'explica el programa de càlcul realitzat amb Matlab mitjançant el coneixement adquirit en el projecte del CAT 07e, així com les necessitats en el disseny per tal de complir la Normativa. Aquest consisteix en una interfície gràfica per a realitzar un anàlisi i càlculs de diferents parts del tren de potència, servint com a eina d'orientació en la definició i disseny dels diferents elements, així com d'instrument de suport per estudiar i entendre com funcionen aquests. L'ampliació d'aquesta aplicació i de les diferents opcions que proporciona es troba a l'***Annex B***.

L'última part de la memòria correspondrà a un anàlisi econòmic del tren de potència del vehicle des del punt de vista elèctric en dos parts: els costos associats al projecte en si i els costos corresponents al disseny, muntatge i elements que formen el tren de potència. També es realitza un estudi d'impacte ambiental el qual es pot trobar a l'***Annex F***.

Sumari

RESUM 1
SUMARI 3
SUMARI DE FIGURES 5
SUMARI DE TAULES 7
1. GLOSSARI 8
2. PREFACI 9
2.1. Origen del projecte 9
2.2. Motivació 10
3. INTRODUCCIÓ 11
3.1. Objectius del projecte 12
3.2. Abast del projecte 12
4. SISTEMA GENERAL DEL TREN DE POTÈNCIA 13
5. MOTORS 17
5.1. Motors síncrons 18
5.1.1. Descripció 18
5.1.2. Principi de funcionament 18
5.1.3. Esquema equivalent 21
5.2. Motor utilitzat 24
5.2.1. Descripció 24
5.2.2. Avantatges i inconvenients 27
5.2.3. Especificacions 28
5.3. Integració en el vehicle 32
5.3.1. Localització i Package 32
5.3.2. Refrigeració 33
6. CONVERTIDORS DC/AC 37
6.1. Descripció 38
6.1.1. Part del control 40
6.1.2. Drivers 42
6.1.3. Part de potència 42
6.2. Integració en el vehicle 47
6.2.1. Localització i Package 47
6.2.2. Refrigeració 49
6.2.3. Proteccions 52

7. FUNCIONAMENT DEL CONVERTIDOR DC/AC. CONTROL ____ 59
Control. FOC i estimació de la posició.... 60
Determinació de la posició. SRF-PLL....61
FOC. Control de camp orientat....64
8. BATERIES ____ 69
8.1. Tipologia. Selecció 70
8.2. Dimensionament i configuració 73
8.3. Integració en el vehicle.... 77
8.3.1. Localització i Package....77
8.3.2. Refrigeració....79
8.3.3. Proteccions 81
9. PROGRAMA DE CÀLCUL TREN DE POTÈNCIA ____ 87
10. ANÀLISI ECONÒMIC ____ 91
CONCLUSIONS ____ 95
Futures línies de treball.... 95
AGRAÏMENTS ____ 97
BIBLIOGRAFIA ____ 99
Referències bibliogràfiques.... 99
Bibliografia complementària.... 99

Sumari de figures

Figura 4.1 Esquema global del Tren de potència 13
Figura 4.2 Diagrama del sistema elèctric principal 14
Figura 4.3 Vista isomètrica posterior del Tren de potència al CAT 07e 14
Figura 4.4 Vista general del CAT 07e 15
Figura 5.1 Esquema genèric dels camps d'estator i rotor d'un motor síncron trifàsic [3] 19
Figura 5.2 Corba de parell-angle de càrrega 20
Figura 5.3 Esquema elèctric del motor i diagrama fasorial [3] 22
Figura 5.4 Esquema elèctric i potències d'un motor síncron [3] 23
Figura 5.5 Balanç de potència del motor 24
Figura 5.6 Corba de desmagnetització de diferents tipus d'imants [[9] 25
Figura 5.7 Configuració genèrica d'una fase (esquerra) i de les tres fases (dreta) dels debanats del Mavilor MA 55WC 25
Figura 5.8 Disposició del semiestator i ranura buida del Mavilor MA 55WC 26
Figura 5.9 Modificació del motor comercial al prototip utilitzat 28
Figura 5.10 Localització dels elements principals del Tren de potència 32
Figura 5.11 Transmissió (esquerra) i Motors i subjecció (dreta) dissenyats amb SolidWorks 33
Figura 5.12 Simulació de la temperatura de l'aigua de refrigeració 34
Figura 5.13 Simulació de les temperatures adquirides pel motor 34
Figura 5.14 Captura de la distribució de temperatures a la carcassa del motor 35
Figura 6.1 Estructura del convertidor DC/AC del CAT 07e 37
Figura 6.2 Placa del resolver al convertidor DC/AC 38
Figura 6.3 Esquema i senyals del resolver 39
Figura 6.4 Sondes de corrent (esquerra) i de tensió (dreta) 40
Figura 6.5 PCB principal del convertidor DC/AC 41
Figura 6.6 Esquema de les freqüències de treball del codi implementat 41
Figura 6.7 Driver 2SP0115T 42
Figura 6.8 Esquema de l'inversor amb circuits de precàrrega, descàrrega i sondes de tensió i corrent. 43
Figura 6.9 Gràfic comparatiu de diferents semiconductors 44
Figura 6.10 Esquema electrònic i símbol (esquerra) i esquema intern (dreta) d'un IGBT 45
Figura 6.11 Corba I-V de l'IGBT 45
Figura 6.12 Carcassa dels convertidors DC/AC 48
Figura 6.13 Captures de la càmera tèrmica en les proves tèrmiques en bancada 51
Figura 6.14 Esquema del sistema elèctric emprat en les proves amb els dos motors connectats 52
Figura 6.15 Bloc drivers, mòdul d'IGBTs i snubbers del convertidor DC/AC 55
Figura 6.16 Comparativa amb i sense snubber de I-V en un transistor genèric 55

Figura 6.17 Gràfic de tensió respecte el temps del circuit de descàrrega 57
Figura 6.18 Gràfic de corrent respecte el temps del circuit de descàrrega 57
Figura 7.1 Esquema del control SRF-PLL 61
Figura 7.2 Senyals ortogonals provinents del resolver 61
Figura 7.3 Senyals vd (groc) i vq(lila) 62
Figura 7.4 Càlcul de la posició del rotor amb el sistema SRF-PLL al CAT 07e 62
Figura 7.5 Càlcul generalitzat de la posició del rotor al CAT 06e 63
Figura 7.6 Resposta de velocitat (1er), senyals $vsin$ i $vcos$ (2on) i posició (3er), davant una acceleració 63
Figura 7.7 Resposta dinàmica del càlcul de posició a una acceleració 64
Figura 7.8 Esquema del sistema de control FOC 64
Figura 7.9 Ones de les sondes de corrent. Convertidor CAT 07e (verd) i comercial INFRANOR (groc) 65
Figura 7.10 Eixos de referència per transformada (superior) 66
Figura 7.11 Evolució de la resposta d'Iq a un graó de parell inicial (esquerra) i final (dreta) 67
Figura 8.1 Esquema elèctric intern d'una bateria genèrica 69
Figura 8.2 Gràfic de l'energia consumida en funció del temps 74
Figura 8.3 Gràfic de la disminució de la tensió total en funció del temps 74
Figura 8.4 Gràfic de l'estat de càrrega respecte el temps 75
Figura 8.5 Detall de les connexions entre cel·les 78
Figura 8.6 Plaques de control de les cel·les i terminals de connexió cel·la-PCB 78
Figura 8.7 Vista d'una caixa de les caixes de bateries del CAT 07e 79
Figura 8.8 Disposició dels ventiladors en una de les caixes de bateries del CAT 07e 80
Figura 8.9 Entrada de flux d'aire (esquerra) i distribució de temperatures a una caixa (dreta) 81
Figura 8.10 Gràfics del circuit de precàrrega 83
Figura 8.11 Relé d'aïllament (esquerra) i fusible (dreta) utilitzats al CAT 07e 84
Figura 8.12 Esquema elèctric proporcionat pel fabricant 85
Figura 8.13 BMS utilitzat en el CAT 07e 86
Figura 9.1 Exemple de finestra en fase de disseny (esquerra) i en fase d'ús (dreta) 88
Figura 9.2 Inspector. Part de la taula de característiques dels elements creats a GUI 88

Sumari de taules

Taula 5.1 Esquema de màquines elèctriques rotatives 17
Taula 5.2 Especificacions proporcionades pel fabricant del Mavilor MA 55WC 29
Taula 6.1 Comparativa d'especificacions dels transistors de potència 44
Taula 6.2 Especificacions del convertidor DC/AC 46
Taula 6.3 Especificacions del mòdul d'IGBTs Fuji 2MBI225VN 47
Taula 6.4 Especificacions del circuit de descàrrega definit en el CAT 07e 56
Taula 7.1 . Estats de commutació de l'inversor 59
Taula 8.1 Comparativa d'avantatges i inconvenients dels tipus de bateries 71
Taula 8.2 Comparativa de diferents paràmetres dels tipus de bateries 71
Taula 8.3 Especificacions del model de bateria Melasta SLPBA843126 del CAT 07e 72
Taula 8.4 Especificacions del circuit de precàrrega definit en el CAT 07e 82
Taula 10.1 Costos dels recursos del projecte 91
Taula 10.2 Costos dels recursos materials del disseny i de muntatge 93

1. Glossari

El glossari es troba a la secció A dels Annexes.

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

El CAT07e és el tercer vehicle elèctric realitzat a l'Escola, després dels seus quatre antecessors de combustió. Aquest projecte, anomenat ETSEIB Motorsport, té com a objectiu representar l'Escola a la competició Formula Student. Aquesta, es tracta d'una competició d'àmbit global a la qual participen equips d'universitats d'arreu del món. Es pot definir com una competició d'enginyeria en la qual, els estudiants de les diferents universitats participants dissenyen, construeixen, desenvolupen i competeixen amb uns vehicles d'estil similar als Formula o altres competicions de l'àmbit durant l'estiu. La Formula SAE va néixer als Estats Units l'any 1981, impulsada per la SAE. L'any 1998 es va introduir a Europa, a Anglaterra, sota la coordinació de l'IMechE, anomenant-se Formula Student.

Com s'ha esmentat, en un inici, a l'Escola es van desenvolupar quatre vehicles de motor de combustió, fins que l'any 2011, es va apostar pel vehicle elèctric.

Després d'un primer any en el qual (CAT05e), l'equip que el conformava requeria d'una adquisició de coneixement important (principalment en les parts electrònica i elèctrica), van aconseguir el seu objectiu de veure el cotxe en moviment, disposant de parts comercials com els convertidors, bateries o centraletes. Això va servir per assentar unes bases en el coneixement d'aquest tipus de vehicles, per als nous membres que entressin a l'equip els anys següents. En el segon any (CAT06e), van voler avançar en diferents aspectes com els convertidors dels motors, que havien sigut una limitació de potència en el primer any de cotxe elèctric, mantenint altres com les bateries o motors. Per això, l'equip va decidir procedir al disseny i fabricació d'uns convertidors propis, que van ser desenvolupats amb Cinergia, empresa col·laboradora amb el projecte, i per en Jordi Abante, membre de l'equip en aquests dos anys.

Finalment, en aquest tercer any (CAT07e), s'ha viscut presonalment aquesta filosofia de continuïtat, evolució i traspàs de coneixement del projecte de la Universitat. Tenint com a tasca principal, el treball i millora dels convertidors per optimitzar el seu funcionament, també era necessari garantir un bon coneixement dels motors, la tipologia i comportament, així com del canvi dut a terme en la font elèctrica del cotxe, les bateries.

El projecte del CAT07e l'han desenvolupat un total de 31 estudiants de l'ETSEIB amb la coordinació de Francesc Roure, Lluís Roger, Manuel Moreno, Daniel Montesinos, Enrique Trillas i Emilio Hernández, professors coordinadors del projecte

Aquest projecte consisteix en la realització d'un programa i la redacció d'un document, motivats per: l'experiència viscuda durant l'any, pel PFC de *Disseny, control i implementació d'un inversor trifàsic per un vehicle elèctric* d'en Jordi Abante (però englobant el sistema elèctric del CAT 07e), la prova estàtica "Design" present a les competicions i el document de validesa dels elements de les seccions elèctrica i electrònica (ESF). A més, en el projecte es tenen en compte aspectes específics de la Normativa Formula Student i es té l'objectiu de recollir el coneixement teoricopràctic adquirit en l'àmbit elèctric, gràcies a la competició i al treball diari a l'equip. Es presenta l'explicació i justificació del disseny del tren de potència del CAT 07e.

2.2. Motivació

Els principals aspectes que motiven aquest projecte, són l'interès pel món de l'automoció i de la competició, que van ocasionar les ganes de formar part d'aquest equip i aconseguir una experiència en aquest àmbit concret. El desig per plasmar part del que s'ha après en aquest any a l'equip, haver de preparar la prova de "Design", realitzar documents com l'ESF i, finalment, la falta d'una font d'informació específica, que permetés l'adquisició de coneixement d'una manera més o menys ràpida del que engloba la secció de tren de potència, per tal d'obtenir una idea del caire de complexitat i dificultats de la secció, han promogut la idea d'aquest projecte.

Cal tenir en compte que a la Universitat, cada any s'ha realitzat un vehicle pràcticament nou o agafant com a base alguna part del seu predecessor. A més, els membres de l'equip es van renovant cada any. Aquests desenvolupen, elaboren i gesten els coneixements al voltant del cotxe anualment, per intentar una major competitivitat. Aquests punts dificulten el traspàs de coneixement entre els estudiants i la conservació en els documents.

El problema descrit, ha donat lloc a aquesta motivació addicional per desenvolupar aquest projecte on, s'explica i justifica el disseny del conjunt del tren de potència del vehicle CAT 07e, el qual serveix per a qualsevol vehicle elèctric de la competició Formula Student, tenint en compte les diferents solucions, disposicions i tipus (segons marques, patrocinadors i origen dels equips universitaris) dels elements que formen aquesta part del cotxe. A més de la redacció i desenvolupament del tren de potència al projecte, es realitza un programa bàsic de càlcul i anàlisi de les diferent parts del conjunt elèctric que permet comprendre certs aspectes, realitzar diverses comprovacions i càlculs. D'aquesta manera, els futurs membres disposaran d'una eina informàtica i un document explicatiu, que permetran conèixer i estudiar les parts elèctriques del cotxe de competició a dissenyar d'una manera concisa.

3. Introducció

El projecte de Disseny i modelització del tren de potència del vehicle elèctric CAT 07e de Formula Student, s'ha realitzat del juny de l'any 2014 al gener de l'any 2015. La idea per realitzar aquest projecte parteix dels primers mesos a l'equip, en els que es duu a terme la fase de disseny del cotxe, i al coneixement adquirit en el període posterior, fins a les competicions.

Aquesta memòria descriu el disseny dels diferents elements que formen el tren de potència del CAT 07e, tenint en compte aspectes de la Normativa, aspectes econòmics (pressupost de l'equip) i conceptes teòrics i característics de cadascuna de les parts que es tenen presents, a l'hora de prendre una decisió per a la seva elecció. A més, s'introdueixen els càlculs, justificacions i hipòtesis que s'utilitzen per a la definició de cada part i el posterior muntatge. Es presenta una part no material, el control, el qual s'utilitza en el funcionament del conjunt elèctric. S'introdueixen els conceptes teòrics que formen el control i alguns trets rellevants de la seva configuració.

A més d'analitzar i justificar el disseny, com s'ha dit anteriorment, es realitza i explica un programa desenvolupat amb Matlab, que permet fer càlculs referents a les parts més característiques del tren de potència, analitzar diferents conceptes, comprovar el compliment de certs punts de la Normativa i estudiar, mitjançant un model de Simulink que intenta assimilar i aproximar-se al model real del control del vehicle, com funciona tot l'esquema elèctric que fa posar en marxa i competir el cotxe.

L'ordre que presenta la memòria intenta mostrar una primera descripció global del conjunt, per després analitzar cadascuna de les parts específiques de darrere a endavant, és a dir, seguint una cadena de disseny: comença amb el motor, segons unes prestacions dinàmiques i uns requeriments de potència, segueix el convertidor i el control implementat (en base a les necessitats de la càrrega i tipus de motor), les bateries i finalment, l'explicació i introducció al programa realitzat, que s'amplia als Annexes.

En el projecte també es presenta un estudi econòmic, part important i de pes dins de l'equip, a l'hora de definir els diferents elements que formen el conjunt, segons un pressupost, i un anàlisi d'impacte ambiental, fet a tenir en compte en el disseny.

3.1. Objectius del projecte

Aquest projecte té com a objectius principals, realitzar un programa de càlcul que ajudi en el disseny del tren de potència i analitzar, explicar i justificar el disseny del sistema elèctric del vehicle de competició CAT07e. Concretant, es poden definir els següents punts a complir:

- Realitzar un programa de càlcul pel tren de potència que permeti el seu estudi i disseny.
- Analitzar el tipus de motor utilitzat, així com estudiar els paràmetres i característiques.
- Explicar els convertidors utilitzats, com funcionen i quins són els elements principals.
- Descriure el control implementat, així com les proves i simulacions fetes per garantir i concloure el correcte funcionament.
- Explicar i caracteritzar les bateries utilitzades, així com els aspectes a tenir en compte en el seu dimensionament. A més, descriure certs elements a incloure en el sistema elèctric per Normativa, per garantir el bon funcionament i una seguretat (proteccions).

3.2. Abast del projecte

L'abast d'aquest projecte queda definit en els apartats anteriors. Gràcies als objectius principals descrits al subapartat anterior, es marca l'abast en els conceptes i parts relacionades amb el tren de potència. S'analitzen, estudien i expliquen els elements principals del sistema elèctric (motors, convertidors i bateries), així com els secundaris que són necessaris per Normativa o pel correcte funcionament del conjunt (proteccions, refrigeració...). A més, s'ha d'incloure la realització i explicació del programa fet mitjançant el programa Matlab.

Per tant, les parts de disseny mecànic com poden ser, les caixes de bateries i la seva distribució interna o el dimensionament de la capsa d'inversors, així com els estudis dinàmics o de resistència mecànica que siguin necessaris realitzar en elements relacionats a la part elèctrica, queden fora de l'abast del projecte, al sortir de l'àmbit elèctric.

Aquest sistema s'uneix amb la part electrònica a través de diferents unitats de control com la frontal o la de darrera que permeten rebre informació i controlar aspectes i elements del cotxe, així com la centraleta principal que controla i uneix tot el sistema global elèctric i electrònic. Aquesta part del cotxe queda fora també de l'abast del projecte, tractant-se d'un coneixement i elements corresponents a una altra secció.

4. Sistema general del tren de potència

El tren de potencia del vehicle elèctric CAT 07e i, en general, de qualsevol vehicle elèctric de la competició Formula Student, disposa d'una sèrie d'elements que permeten el correcte i segur funcionament del cotxe sota una Normativa de la Formula SAE.

Les tres parts principals de les que disposa el tren de potència del vehicle elèctric són: la màquina elèctrica (motor), el convertidor DC/AC (inversor) i la font d'energia (bateries).

A més, disposa d'alguns elements addicionals que són necessaris per a la seguretat de les persones que treballen sobre el cotxe, el bon ús en cohesió de les diferents parts i, per tant, en la posada en marxa de l'automòbil, amb el corresponent compliment de la Normativa aplicada. Aquests són: els elements de protecció (fusibles, relés, sensors de corrent i tensió), l'element d'aïllament de la part d'alt i baix voltatge (IMD), els circuits de precàrrega i descàrrega, el sistema de control de bateries (AMS o BMS), refrigeració i el cablejat, entre altres, més focalitzats a la part electrònica. A la figura següent es pot apreciar un esquema genèric del sistema amb alguns dels elements esmentats:

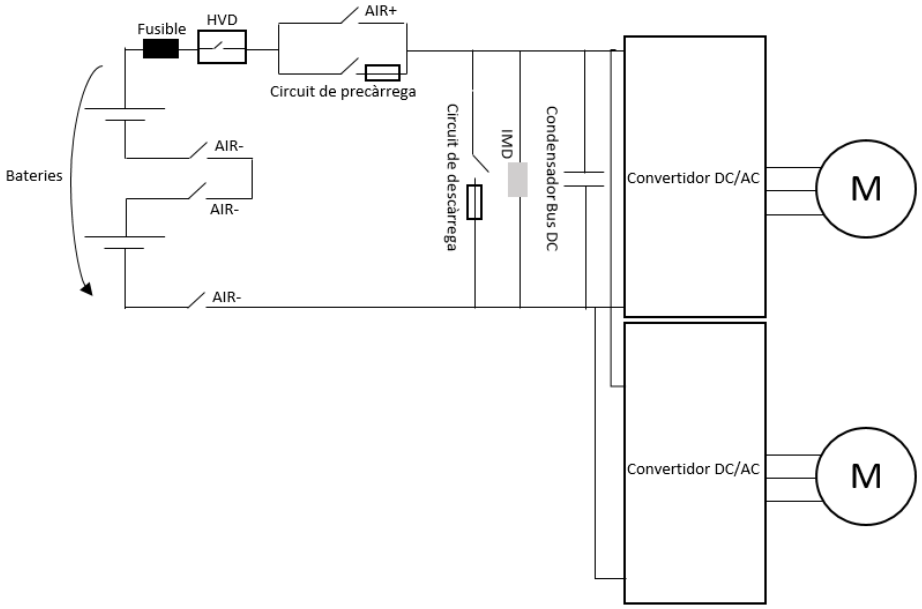


Figura 4.1 Esquema global del Tren de potència

A més, un altre aspecte a tenir en compte a l'esquema global, són els canvis que es produeixen a nivell energètic o a nivell de tipus d'intensitat requerida per la càrrega que, accionada per un tipus de motor concret de corrent altern (tenint en compte que la font proporciona corrent continu), fa necessari la presència del convertidor inversor al mig.

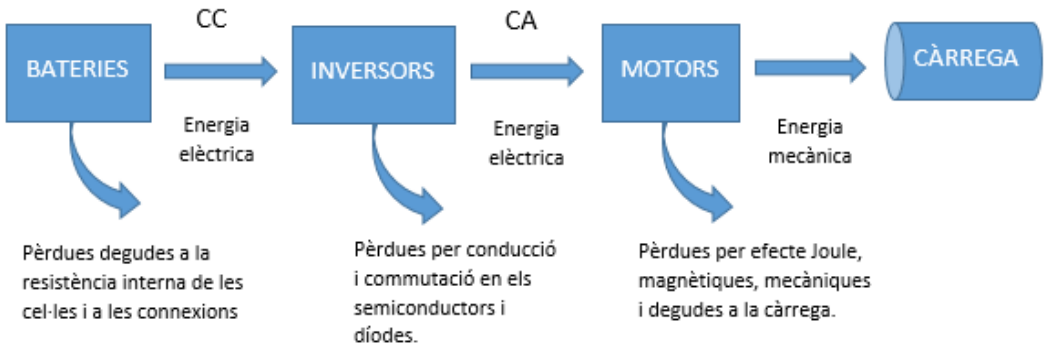


Figura 4.2 Diagrama del sistema elèctric principal

Els canvis produïts a nivell de corrent, i les variacions d'energia des de bateries fins al punt final del tren de potència, venen donats pels propis elements que formen el sistema elèctric, els quals tenen una eficiència i, per tant, unes pèrdues associades. Aquestes es poden apreciar a la *Figura 4.2*, on només es representen els elements elèctrics més rellevants, a nivell de funcionament del cotxe. D'aquesta manera s'indica que els components no tenen un comportament ideal. Aquest és un fet que s'ha de tenir en compte en el disseny, a través d'un factor de seguretat, que sobredimensioni certs elements del conjunt, per tal de poder disposar de l'energia necessària per a realitzar qualsevol de les proves que formen una competició de Formula Student, sense problemes.

A més, s'ha d'aconseguir que sigui segur per la persona que el porta, garantir la protecció dels elements utilitzats davant una possible fallida (tenint en compte costos i pressupost d'un equip, cal evitar que elements d'important valor es puguin trencar) i optimitzar el funcionament del sistema elèctric, així com el del vehicle en general. Aquests punts s'aconsegueixen estudiant la potència a dissipar per la refrigeració, la disposició dels elements per definir l'estructura i forma final del cotxe des del punt de vista mecànic i aerodinàmic, els balanços de masses...

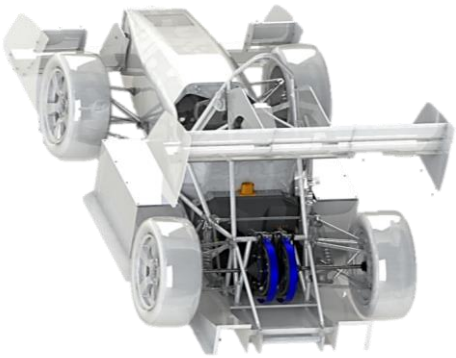


Figura 4.3 Vista isomètrica posterior del Tren de potència al CAT 07e

Com s'ha esmentat en apartats anteriors, els aspectes mecànics i aerodinàmics que poden afectar en el disseny de la part elèctrica queden fora de l'abast d'aquest projecte.

Per a la realització del tren de potència del vehicle elèctric, cal realitzar un estudi i investigació del que exigeix la Normativa, així com dels elements a utilitzar, per tal d'aconseguir el millor rendiment i resultats a les proves de la competició. En el present projecte, es vol explicar i plasmar aquest anàlisi i estudi necessaris per obtenir el cotxe final amb el qual competir, tenint en compte les parts elèctriques involucrades, els fets i problemes a considerar, el pressupost del que es disposa i l'impacte que pot suposar.

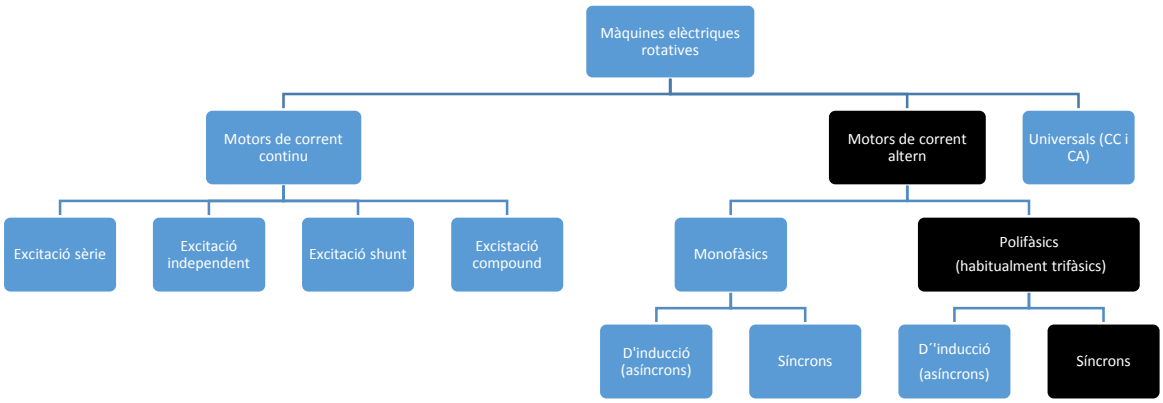
En els següents capítols i apartats, s'analitzen a fons els tres elements elèctrics principals del CAT 07e (motors, convertidors i bateries), així com els elements secundaris de més rellevància, que influeixen en la integració en el vehicle. Es mostren els paràmetres i característiques de les opcions considerades, que són objecte d'estudi, buscant escollir la més adequada segons factors com: el funcionament de cada part elèctrica i el global del tren de potència. S'analitza la seva integració en el cotxe, per tal d'optimitzar el conjunt. En aquest procés, es tenen en compte diferents aspectes i conceptes elèctrics (teòrics i pràctics) que influeixen en el disseny, com ho fan diferents paràmetres i variables mecàniques i aerodinàmiques.

Finalment, aquest estudi ha permès desenvolupar un programa de càlcul, referent a diferents parts del tren de potència, el qual s'analitza breument a la Memòria i s'amplia a l'***Annex B***.

Figura 4.4 Vista general del CAT 07e

5. Motors

El vehicle realitzat per l'equip ETSEIB Motorsport en la temporada 2013-2014 es tracta, com s'ha comentat en apartats anteriors, del tercer vehicle elèctric. Un dels punts que més diferencien aquest tipus de cotxe, dels que es poden trobar competint a les proves de Formula Student en la part de combustió, és el motor utilitzat. En aquest cas, cal una màquina elèctrica que pugui proporcionar la potència necessària a la càrrega, en base a uns requeriments i unes necessitats dinàmiques (mecàniques). En aquest punt, la diversitat de màquines és àmplia, com es mostra a la *Taula 5.1*. Centrant atenció només en les de tipus rotatiu, es poden trobar de corrent continu, de corrent altern o que puguin treballar amb els dos tipus (universals). Dins de les de Corrent Continu es poden trobar diferents tipus, segons la configuració de l'excitació i l'induït. En les de Corrent Altern, es troba una primera classificació segons el número de fases del motor (monofàsics, polifàsics) i una segona, en la que es pot distingir entre els d'inducció i els síncrons.



Taula 5.1 Esquema de màquines elèctriques rotatives

A la *Taula 5.1* es veu una classificació genèrica dels diferents motors elèctrics rotatius (sense entrar en les tipologies específiques dels síncrons i d'inducció). Cada un d'aquests tipus té unes característiques associades, a més d'uns avantatges i inconvenients. La complexitat del motor i el fet, que cada cop s'utilitzin i construeixin menys, fa que els motors de corrent altern siguin més econòmics a la llarga que els de corrent continu. Aquest punt s'ha de tenir en compte en el disseny, donat que hi ha un límit, el pressupost. A més, els de corrent altern, disposen d'una taxa d'acceleració significativa i disposen d'una gran eficiència en sistemes on són controlats per un inversor. Finalment, tenint en compte els circuits de la competició i el rang de potència total per Normativa [1] (85 kW), s'observa que els nivells de parell i velocitat necessaris s'han de considerar importants (no oblidant aspectes de volum), fet pel qual, s'opta per la opció de corrent altern.

Afegir, que la tria de la màquina es va dur a terme en el 1er vehicle elèctric del equip (CAT 05e) i que el motor s'ha utilitzat i mantingut fins a la temporada 2013-2014 inclosa (CAT 07e). L'elecció es va realitzar en base a unes corbes de sol·licitacions de parell-velocitat a la roda del vehicle, que es van considerar suficients per a l'elecció en aquell moment. Per tant, en base a aquest aspecte i el tema econòmic, es va prendre la decisió d'optar per un motor de corrent altern síncron, el qual disposa d'un bon rang de potència, gran rendiment i és més adaptable a baixes velocitats i alta potència que el d'inducció.

5.1. Motors síncrons

5.1.1. Descripció

Aquest tipus de màquines es caracteritzen per tenir aplicacions per a treballar tant com a motor i com a generador. En el cas del vehicle, el seu ús és com a motor, malgrat que la possibilitat de treballar com a generador també és d'utilitat per a realitzar diferents proves (es fa referència a una d'elles a l'apartat 6.2.2 sobre el Control del tren de potència).

Els motors síncrons poden ser monofàsics o polifàsics, tal i com es mostra a la *Taula 5.1*. A més, els síncrons tenen diferents construccions i configuracions. L'estator és una peça on es disposen els conductors en ranures, formant els debanats corresponents al número de fases del motor (el cas específic és trifàsic amb les fases desfasades 120º). El rotor es caracteritza per tenir el mateix número de pols que l'estator, podent ser de dos tipus, llis o de pols sortints. La diferència física entre ambdós, és que el primer dóna lloc a un entreferro constant i el segon, un variable. El rotor llis s'utilitza en màquines d'eix horitzontal que han de treballar a velocitats angulars elevades i per tant, forces centrífugues importants, mentre que el de pols sortints és el cas contrari.

5.1.2. Principi de funcionament

El principi de funcionament d'aquest tipus de motors es basa en generar un camp magnètic giratori, alimentant els debanats estatòrics amb tensions compostes de pulsació

$$\omega_s = 2\pi f_s \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right) \quad \textbf{(5.1)}$$

i circulant intensitats de la mateixa freqüència. Aquests corrents són els que generen un camp magnètic giratori d'una certa amplitud i velocitat ω_s. A més, cal tenir en compte el nombre de parell de pols de la màquina ja que afectarà a la velocitat de gir del camp o de sincronisme:

$$\omega_s' = \omega_s / p \quad \textbf{(5.2)}$$

on p són els parells de pols del motor.

Per tant, tenint en compte que l'acció dels camps del rotor i estator provoquen unes forces tangencials, que donen lloc a un parell d'atracció entre ambdós, arrossegant l'estator al rotor (funcionant com a motor), es dedueix que aquest tipus de motors giren a velocitat aproximadament constant segons la freqüència de l'alimentació (en el cas concret l'associada al control del motor). L'acció dels dos camps implica el gir de la màquina.

Fent el símil dels camps magnètics creats a estator i rotor (gràcies a les intensitats que circulen) amb imants girant a la mateixa velocitat ω_s', suposa que l'angle de desfasament (δ_H) entre els imants, es mantingui aproximadament constant. A través d'aquest angle, es dedueix el parell en la màquina síncrona de pols llisos (tipus utilitzat en el vehicle), el qual es proporcional al sinus d'aquest angle δ_H [3]:

$$\Gamma = k_1(t) \cdot \sin(\delta_H) \quad \textbf{(5.3)}$$

On $k_1(t)$ és un factor proporcional al producte dels camps generats a rotor i estator, H_s i H_r.

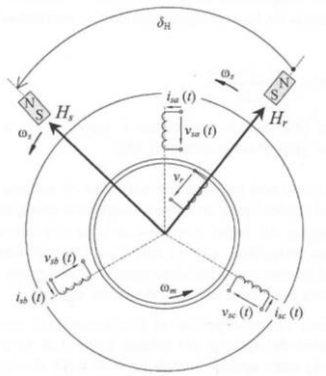


Figura 5.1 Esquema genèric dels camps d'estator i rotor d'un motor síncron trifàsic [3]

Aquest angle de desfasament marca la zona de treball estable de la màquina síncrona [3]. En el cas de treballar de manera estable com a motor, l'angle δ_H ha de ser positiu (això implica que l'imant de l'estator avança i arrossega el del rotor), variant entre 0 i +90º com es pot veure a la *Figura 5.2*, on s'aprecia, a més, la zona de treball com a generador. Cal remarcar, que amb l'angle de desfasament,

passa el mateix que amb la velocitat de sincronisme ja que δ_H variarà en funció del número de parell de pols del motor:

$$\delta'_H = 90^o/p \quad \textbf{5.4)}$$

Un paràmetre similar a δ_H, al qual es fa referència a la *Figura 5.2*, és l'angle de càrrega δ, el qual representa el desfasament entre la tensió d'alimentació trifàsica del motor i la tensió induïda en el mateix, com s'analitza a l'apartat 5.1.3. Els dos paràmetres van associats a la càrrega disposada a la sortida del motor, amb la diferència que aquesta variable δ permet analitzar el funcionament i l'estabilitat, sense imposar la condició d'intensitat consumida constant (situació més pròxima al cotxe elèctric, on el parell, i per tant, la intensitat requerida en cada instant, va variant segons les situacions i formes de la pista).

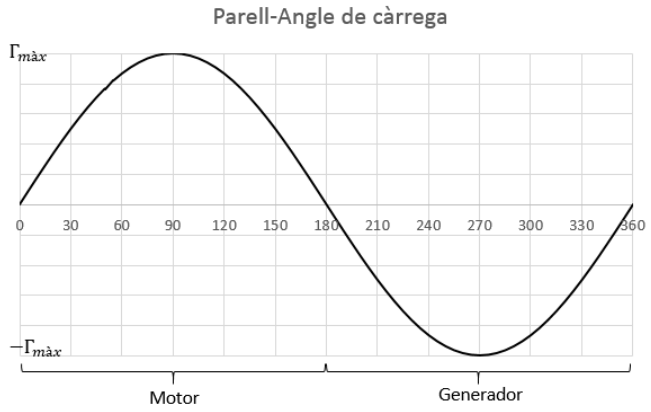


Figura 5.2 Corba de parell-angle de càrrega

Segons la corba de la *Figura 5.2*, el parell màxim (Nm) s'obté per un angle de càrrega de 90º. Això mostra que, si es mantenen constants les intensitats dels debanats de l'estator, un augment de la càrrega, suposa un increment de la potència sol·licitada i un desfasament major entre els imants de l'estator i el rotor, fet que implica, un increment de l'angle δ_H. Això es produeix perquè la velocitat es mantindria constant al fixar la freqüència d'alimentació i per tant, el que variaria en termes de potència seria el parell:

$$P_{elec} = {\Gamma \cdot \omega_m}/{\eta_{mot}} \quad \textbf{(5.5)}$$

De la *Figura 5.2* s'obté la relació directa entre el parell mecànic i l'angle de càrrega [3]:

$$\Gamma = \frac{P_{mec}}{\omega_m} = \frac{P_i - P_{p,mec}}{\omega_m} \approx \frac{P_{elec}}{\frac{\omega_s}{p}} = \frac{3}{\frac{\omega_s}{p}} \cdot \frac{U_s E_s}{X_s} \sin\delta \quad \textbf{(5.6)}$$

A l'equació 5.6 es consideren negligibles les pèrdues a la resistència dels debanats de l'estator, així com les pèrdues mecàniques.

La expressió equivalent de la potència activa elèctrica s'obté desglossant la potència aparent elèctrica de l'esquema de la *Figura 5.3*:

$$S_{elec} = 3 \cdot \underline{U_s} \underline{I_s^*} = 3 \cdot \underline{U_s} \left(\frac{\underline{U_s} - \underline{E_s}}{jX_s} \right)^* \quad \textbf{(5.7)}$$

Mitjançant aquesta expressió i prenent com a referència el fasor $\underline{U_s}$, es sap que el fasor de la tensió induïda $\underline{E_s}$ està desfasat un angle – δ.

Per tant, si es produeix un augment del parell resistent, també s'haurà de produir un augment del parell mecànic del motor, per a mantenir l'equilibri de parells i una velocitat de funcionament constant. D'aquesta manera es dedueix de l'equació 5.6, que mantenint la tensió d'alimentació trifàsica, la induïda i la velocitat de funcionament, l'angle de càrrega δ augmentarà.

Aquest punt és important ja que marca el correcte funcionament de la màquina. En cas de superar l'angle límit de càrrega, el camp del rotor no pot seguir la velocitat de gir del camp de l'estator, el que suposaria la pèrdua de velocitat i l'exposició a canvis continus del sentit de parell, fet que produiria brusques vibracions, com a conseqüència de la pèrdua de sincronisme.

5.1.3. Esquema equivalent

A continuació es presenta l'esquema elèctric de la màquina síncrona funcionant com a motor.

És important diferenciar el seu funcionament com a motor o generador ja que el balanç de potència varia (el sentit del corrent és invers), així com el significat dels paràmetres de les equacions associades a l'esquema elèctric equivalent. Es considera una reactància de dispersió constant, unes pèrdues al ferro negligibles i un entreferro uniforme. Les equacions que defineixen el comportament en règim permanent del cas concret a treballar, el motor síncron de pols llisos, són:

$$\underline{U_s} = (R_s + jX_s)\underline{I_s} + \underline{E_s} \quad \textbf{(5.8)}$$

$$U_e = R_e I_e \quad \textbf{(5.9)}$$

$$\Gamma = Re\{\underline{E_s}\underline{I_s^*}\}/\omega_m \quad \textbf{(5.10)}$$

Aquestes equacions representen, respectivament, la tensió d'alimentació d'una fase, la tensió de l'excitació i el parell associat. La tensió d'alimentació per a una fase equival a la intensitat circulant pels debanats de l'estator, per la suma fasorial de la resistència i reactància dels debanats i la tensió induïda per fase als debanats, degut al camp creat pel corrent circulant pel debanat d'excitació. Aquesta tensió induïda és la força electromotriu generada, que correspon a:

$$E_s = K_e I_e \omega_m = K_e I_e \frac{\omega_s}{p} \quad \textbf{(5.11)}$$

On K_e és un factor depenent de la reactància de magnetització de la màquina,

$$K_e = {X_m}/{\sqrt{3}} \quad \textbf{(5.12)}$$

Finalment, la fase corresponent a la tensió induïda és la diferència entre la fase de la tensió trifàsica d'alimentació i l'angle de càrrega, tal i com es pot veure a la *Figura 5.3*.

$$\varphi_{E_s} = \varphi_{U_s} - \delta \quad \textbf{(5.13)}$$

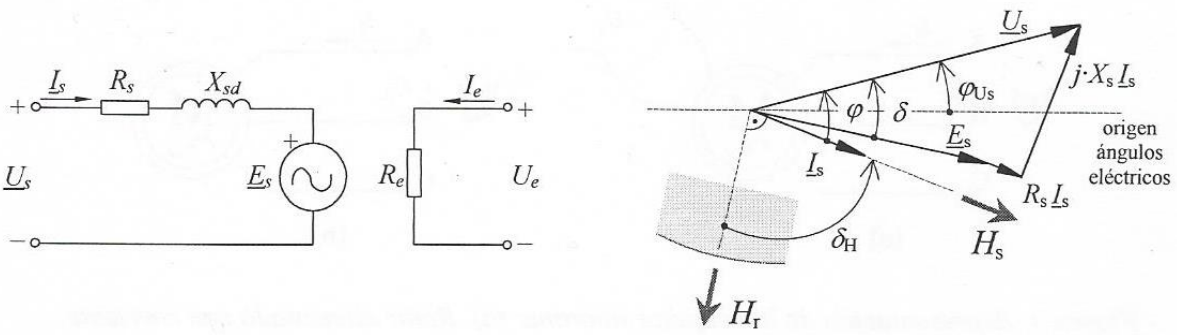


Figura 5.3 Esquema elèctric del motor i diagrama fasorial [3]

Com s'aprecia en el diagrama fasorial de la *Figura 5.3*, i com s'ha esmentat a l'apartat 5.1.2, l'angle de càrrega δ és positiu ja que $\underline{U_s}$ avança al fasor $\underline{E_s}$. A més, es veuen representats els camps associats al estator i al rotor, així com l'angle de desfasament entre ells, que mostra com el camp de l'estator arrossega al del rotor, mantenint la velocitat constant. El camp de l'estator (H_s) ve generat per la intensitat $\underline{I_s}$, mantenint el mateix sentit que aquesta (injectant corrent a l'interior del motor per les seves fases).

A l'apartat 4, ja s'ha esmentat la importància que té considerar les pèrdues que es poden produir per al disseny. Es poden destacar dos motius: dimensionament del sistema segons la potència màxima que

està permesa produir per Normativa i la realització d'un disseny òptim de la refrigeració, necessària per al manteniment dels motors durant el seu ús. En base a això, a continuació es presenta un desenvolupament de les pèrdues associades al motor, tenint en compte l'esquema de la *Figura 5.4*, corresponent a una fase del motor síncron.

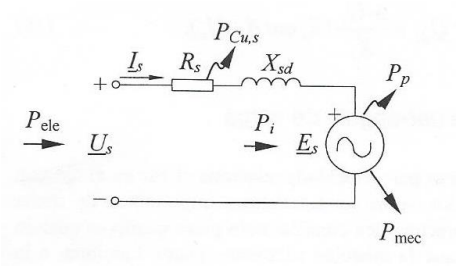


Figura 5.4 Esquema elèctric i potències d'un motor síncron [3]

El motor s'alimenta amb la potència elèctrica provinent del convertidor que transforma de corrent continu a corrent altern, el que proporcionen les bateries.

$$P_{elec} = 3 \cdot Re\left(\underline{U}_s \underline{I}_s^*\right) = 3U_s I_s \cos\varphi \quad \textbf{(5.14)}$$

On el $\cos\varphi$ correspon al factor de potència del motor que, segons la *Figura 5.3*, fa referència al desfasament entre el fasor de la tensió d'alimentació i el del corrent consumit pel motor.

Les pèrdues que es produeixen als debanats de l'estator per efecte Joule, estan relacionades a la resistència que presenten aquests.

$$P_{p,Rs} = 3 \cdot R_s I_s^2 \quad \textbf{(5.15)}$$

D'aquesta manera, la potència de la font que representa la tensió induïda a la *Figura 5.3*, correspon a la diferència entre les dos expressions anteriors.

$$P_i = P_{elec} - P_{p,Rs} = 3 \cdot Re(\underline{E}_s \underline{I}_s^*) \quad \textbf{(5.16)}$$

Aquesta potència interna (P_i) és la que es transforma en mecànica: una part en forma de pèrdues mecàniques (vibracions, friccions...) i una altra part en forma de potència útil mecànica, la qual es transmet a les rodes del darrere (en el cas concret del vehicle) i permet la tracció i moviment, suportant la càrrega equivalent que suposa el cotxe.

$$P_i = P_{p,mec} + P_{mec} \quad \textbf{(5.17)}$$

$$P_{mec} = \Gamma_m \omega_m \quad \textbf{(5.18)}$$

D'aquest desenvolupament del balanç de potències, visible al gràfic de la *Figura 5.5*, s'extreu el concepte d'eficiència o rendiment, on es relaciona la potència útil produïda amb la potència d'alimentació o de subministrament i les pèrdues en tot el sistema.

$$\eta = 100 \cdot \frac{P_{útil}}{P_{total}} = 100 \cdot \frac{P_{mec}}{P_{elec}} = 100 \cdot \frac{P_{mec}}{P_{mec}+P_{p,Rs}+P_{p,mec}} \quad \textbf{(5.19)}$$

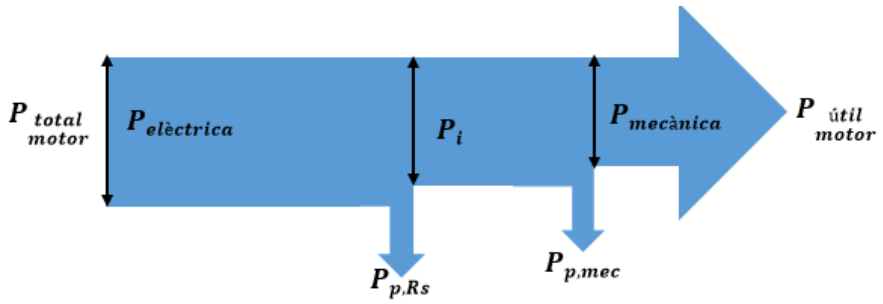


Figura 5.5 Balanç de potència del motor

5.2. Motor utilitzat

Seleccionat el motor síncron trifàsic pels avantatges que presenta vers els d'inducció i tenint en compte dos aspectes importants en un equip com aquest, com són el pressupost i l'oferta del mercat, la màquina elèctrica utilitzada és un prototip del Mavilor MA 55WC.

5.2.1. Descripció

Es tracta d'un motor síncron de flux axial i d'imants permanents (PMSM). La disposició interna del conjunt és en direcció axial (de l'eix de sortida) amb el rotor situat al centre, entre dos semiestators (es divideix l'estator) magnèticament actius que creen el camp i posseeixen grans superfícies polars. La construcció es compon del rotor, l'entreferro (que es troba a ambdós costats de la part mòbil) i els dos semiestators (de diàmetre exterior 170 mm i interior 84 mm). Les tres parts són discs paral·lels sobre el mateix eix. El flux magnètic travessa l'entreferro en la direcció de l'eix, a diferència dels motors de flux radial, en els quals la direcció és perpendicular a l'eix.

Els imants permanents són de Samari Cobalt (Sm Co), els quals es caracteritzen per generar grans camp magnètics respecte els imants de ferrita o ceràmics, temperatures de treball més elevades, un major camp coercitiu i bona resistència a l'oxidació. Els defectes que presenten són: un cost elevat, fragilitat i una força de camp magnètic inferior als de Neodimi. Disposen d'una gran capacitat d'emmagatzemament d'energia i tenen una baixa degradació. A la *Figura 5.6* es presenta una comparativa amb els imants ceràmics, de ferrita i els de Neodimi (els més recents). Aquests últims, són també de terres rares i presenten millores respecte els de Sm Co com els costos, la força de camp magnètic o el predomini en quantitat i facilitat d'obtenció.

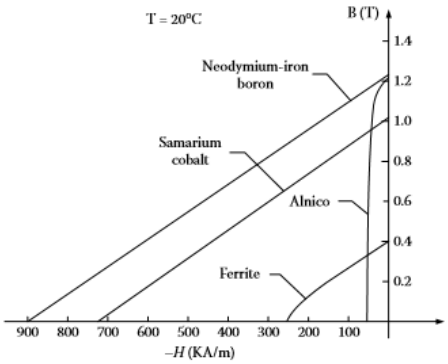


Figura 5.6 Corba de desmagnetització de diferents tipus d'imants [[9]

Els debanats dels semiestators són trifàsics. No hi ha dispersió de flux, exceptuant als caps de bobina i entre pols del mateix semiestator (depenent de la separació entre els dos semiestators i del pas polar). A més, es caracteritzen per una baixa inductància, la qual permet una bona resposta transitòria a un graó de tensió.

Una configuració típica dels debanats d'aquest motor és la que es pot veure a la *Figura 5.7*, que facilita la construcció i proporciona una ona de força magnetomotriu sinusoïdal amb poca distorsió harmònica.

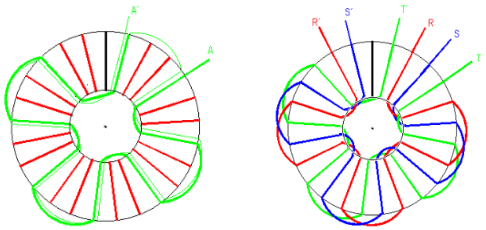


Figura 5.7 Configuració genèrica d'una fase (esquerra) i de les tres fases (dreta) dels debanats del Mavilor MA 55WC

Cada semiestators consta de 25 ranures, de les quals una es deixa buida, com s'observa a la *Figura 5.8*, per reduir el fenomen del "cogging" o cosit magnètic.

El “cogging” és un fenomen depenent de la posició i periodicitat per revolució del motor, que genera un parell de detenció, fent variar el parell mecànic demanat. És degut a la interacció entre els imants permanents del rotor i les ranures de l’estator. Es tracta d’una component no desitjada que altera el funcionament del motor amb vibracions significatives, sobretot a baixes i altes velocitats. El moment d’inèrcia generat filtra l’efecte d’aquest parell.

Amb la disposició que presenta el Mavilor, hi ha 24 actives, que són múltiples del nombre d’imants que disposa el motor. Això suposa, que al estar encarats els imants amb les dents, l’esforç d’atracció per la reluctància del ferro estatòric sigui molt diferent a quan estan desencarats, fet que provoca l’oscil·lació del parell motor. Amb les 25 ranures, el fet de deixar una buida sense conductors actius, permet aconseguir una asimetria repartida en els 360^{o} i la presència d’aire en aquest buit, el qual esmorteeix aquest fenomen sobre el parell. Per tant, aquesta ranura s’ha buidat per reduir aquesta problemàtica ja que el Mavilor MA 55WC no està dissenyat per a l’aplicació en automoció, sinó com a servomotor. Això podria agreujar els problemes d’arrancada del cotxe amb la corresponent pèrdua de temps en les proves.

Figura 5.8 Disposició del semiestator i ranura buida del Mavilor MA 55WC

Respecte al motor que el fabricant comercialitza, l’utilitzat per l’equip difereix en certs aspectes que a continuació es detallen:

- Disposa d’un circuit tubular per poder refrigerar amb aigua els motors, ja que pot ser sotmès a sol·licitacions elevades durant períodes significatius de temps.
- El resolver que permet realitzar la lectura de posició per al control és accessible.
- Algunes parts del motor es van substituir per altres fetes de materials més lleugers però resistents, per suportar les condicions a les que es veu sotmès i reduir pes global del cotxe, respecte el motor comercialitzat de la *Figura 5.8*.

5.2.2. Avantatges i inconvenients

El motor seleccionat (Mavilor MA 55WC) disposa de diferents característiques i certs avantatges que el fan idoni per al seu ús en el vehicle elèctric, però també té certs inconvenients importants que poden afectar en el cotxe.

Avantatges

A més de les característiques mencionades a l'apartat 5.1 dedicades al motor síncron i alguns aspectes esmentats a la descripció del motor utilitzat, a continuació es presenten diferents aspectes que fan positiu aquest motor, tant per la seva construcció com pel seu funcionament:

- La disposició axial del conjunt el fa més compacte, reduint el volum total per aplicacions genèriques i habituals d'aquest tipus de màquines elèctriques.
- Limiten millor els esforços i càrregues sobre coixinets que els motors radials.
- Presenten una bona eficiència vers motors radials i inclòs els d'inducció.
- Les seves prestacions mecàniques a baixes i altes velocitats, el fan idoni per proves com l'acceleració.
- Baix moment d'inèrcia i volum del rotor, el que implica una menor massa del mateix.
- La disposició del rotor entre els dos semiestators és positiva des del punt de vista tèrmic ja que divideix les pèrdues en el ferro i el coure en dues zones, donant lloc a una millor evacuació del calor generat, gràcies al increment de la relació entre la superfície de dissipació i el volum de ferro estatòric.
- Permeten adquirir parells més elevats que un motor radial del mateix pes.
- Suporten càrregues considerables en direcció radial.

Inconvenients

A l'equip, com s'ha esmentat abans, el pressupost és un factor a tenir en compte, el que porta a contemplar les ofertes del mercat que puguin, a un baix cost, proporcionar un motor competitiu i fiable, malgrat que no disposi de les millors prestacions.

- Aquest tipus de motors presenten certa complexitat de construcció, que eleva els costos en cas de requerir una reparació o modificació.
- Les sobrecàrregues el poden desmagnetitzar i això suposaria que deixés de funcionar, amb les conseqüències que podria suposar i més tenint en compte el lloc i el moment.
- Presenta una falta de control del camp magnètic.
- El model escollit no és un motor específic d'aplicació automobilística i això comporta que, malgrat ser un motor de bones prestacions dins dels motors síncrons d'imants permanents de flux axial, en molts aspectes no sigui el més idoni. La seva potència específica

(relacionant la potència que pot proporcionar respecte la seva massa) és molt millorable i les seves dimensions, per aquest ús concret, fan difícil la seva integració al vehicle. Per això, algunes parts del motors es canvien per tal de fer-lo més lleuger i reduir pes del conjunt, com es veu a la *Figura 5.9*.

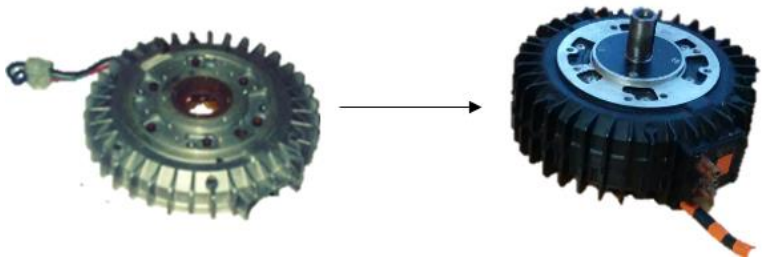


Figura 5.9 Modificació del motor comercial al prototip utilitzat

- Aquest tipus de motors presenten dificultats per posar-los en marxa ja que en repòs tenen parell mig nul. Això es soluciona gràcies al convertidor DC/AC que permet, a través de la implementació d'un control, variar la freqüència de l'alimentació del motor i fer-la creixent des de zero fins al límit de velocitat del motor.
- No poden patir grans càrregues en direcció axial.

5.2.3. Especificacions

La màquina elèctrica queda definida com un motor trifàsic síncron d'imants permanents de flux axial amb un disseny de refrigeració amb aigua.

Té un parell nominal d'arrencada de 31,8 Nm i el pic de parell està limitat a 190,8 Nm. La velocitat màxima d'operació treballant a 400 VAC és 6045 rpm. Segons la corba de parell-velocitat, la màxima potència mecànica en treball continu és 24 kW i el pic de potència és superior als 37 kW.

Com s'ha esmentat anteriorment, disposa d'un resolver que facilita la lectura de posició del rotor per al control per parell implementat, explicat a l'apartat 7.

Es tracta d'un motor classe F que suposa un escalfament màxim fins a una temperatura de 155ºC i de protecció IP 54 que indica un nivell de protecció contra el pols, la entrada del qual no pot evitar-se, però no ho ha de fer en una quantitat que pugui fer malbé el funcionament del motor (indicador 5) i que no ha d'entrar aigua a una mitjana superior a 10 litres per minut i una pressió de 80-100 kN/m^2 durant un temps superior a 5 minuts (indicador 4).

A continuació, es presenta a la *Taula 5.2* les especificacions del motor Mavilor MA 55WC, utilitzat en el vehicle elèctric CAT 07e.

Característica	**Valor del prototipus Mavilor MA 55WC**
Màxima velocitat	6000 rpm
Número de parell de pols	4
Parell d'arrencada	31,8 Nm
Parell nominal a 3000 rpm	22,5 Nm
Parell màxim	190,8 Nm
Potència nominal a 3000 rpm	7 kW
Tensió d'alimentació	230 V
Intensitat nominal a 3000 rpm	23,7 A
K_e	0,49 Vs/rad (rms)
K_t	0,84 Nm/A (rms)
L_{qd}	0,83 mH
R_s	0,2 Ω
$\boldsymbol{K_\lambda}$	103 mWb
J_m	3,6 gm^2

Taula 5.2 Especificacions proporcionades pel fabricant del Mavilor MA 55WC

Els valors mostrats a la *Taula 5.2* són alguns dels més significatius i a tenir en compte, des del punt de vista del disseny del tren de potència del vehicle elèctric, ja que alguns d'ells són necessaris pel dimensionament del conjunt i altres per a la implementació del control.

La velocitat màxima marca el punt límit de funcionament en bones condicions de gir del motor, per això, al igual que en aspectes de parell màxim i temperatures, s'utilitzen unes alarmes en el programa implementat en el convertidor DC/AC per al control, introduïdes i explicades a l'apartat 6.2.3.

El número de parell de pols marca la relació entre la velocitat mecànica del motor i la velocitat o pulsació elèctrica de l'alimentació trifàsica del motor, segons la següent expressió:

$$\omega_e = p\omega_m \quad \textbf{(5.20)}$$

Tenint en compte que p=4 i coneixent la velocitat màxima de la màquina en rad/s queda:

$$\omega_e = 4 \cdot 6000 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \cdot \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 2513{,}27 \text{ rad/s}$$

Sabent que,

$$\omega_m = 2\pi f_m = 6000 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \cdot \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 628{,}32 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \rightarrow f_m = 100 \text{ Hz} \quad \textbf{(5.21)}$$

I per tant,

$$f_e = 4 \cdot f_m = 400 \text{ Hz} \quad \textbf{(5.22)}$$

Els valors proporcionats a la *Taula 5.2* es poden apreciar a l'***Annex I***, on s'inclou la fitxa tècnica adquirida del fabricant, que determinen els paràmetres a través d'un assaig en banc de proves amb una tensió d'alimentació de 230 V.

A través de la constant EMF (K_e) es pot veure la relació directament proporcional entre la tensió i la velocitat i, per tant, amb la freqüència. Per adquirir la màxima velocitat caldria una tensió en valor eficaç de:

$$V_{rms} = 0{,}49 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{rad}} \cdot 6000 \text{ rpm} \cdot \frac{2\pi}{60} = 307{,}9 \text{ V} \rightarrow V_{max} = \sqrt{2} \cdot V_{rms} = 435{,}4 \text{ V}$$

Mitjançant la constant de parell es pot determinar el parell mecànic realitzat per a un valor de corrent eficaç d'alimentació:

$$\Gamma_m = 0{,}84 \frac{\text{Nm}}{\text{A}} \cdot 150 \text{ A} = 126 \text{ Nm}$$

Aquest valor marca el parell màxim que es pot demanar al cotxe, ja que deixant un factor de seguretat, una de les alarmes abans esmentades del programa estableix un límit de corrent per evitar fer malbé cap element del convertidor o del motor.

Per Normativa [1], com s'ha comentat anteriorment, es limita la potència màxima a 85 kW. A continuació, es determina la potència nominal del Mavilor MA 55WC tenint en compte els seus paràmetres i la corba SOAC (***Annex I***):

$$P_{nominal} = \sqrt{3} \cdot K_e \cdot 5500 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot K_t \cdot 27{,}5 = 11{,}3 \text{ kW} \quad \textbf{(5.23)}$$

Si enlloc de considerar els valors de les constants de la *Taula 5.2*, es consideren els teòrics que el fabricant dóna al catàleg:

$$P_{nominal} = \sqrt{3} \cdot 0{,}6 \cdot 5500 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot 1 \cdot 27{,}5 = 16{,}5\ kW$$

Coneguda la potència nominal, es poden analitzar altres punts que permetin garantir (amb la disposició dels dos motors utilitzats a la part del darrere del cotxe per a la tracció de les rodes) que no es sobrepassa el pic màxim de potència establert. Per això, tenint en compte el gràfic proporcionat pel fabricant (***Annex I***), es realitza un anàlisi de la potència que es pot arribar a obtenir en treball continu.

Un punt d'estudi és on el parell deixa de ser constant i que s'estableix com el punt de potència màxima en la corba de parell del motor (1). Per aquest punt marcat a la Figura de l'***Annex I*** es determina:

$$P = \Gamma \cdot \omega \approx 190 Nm \cdot 1300 \cdot \frac{2\pi}{60} \approx 26\ kW$$

Tenint en compte que seria el desenvolupat per un motor, en total s'estarien desenvolupant 52 kW, un 61% del màxim permès. En comparativa, s'analitza el punt de tall de la corba del parell motor amb la de parell resistiu (2) a l'***Annex I***.

$$P = \Gamma \cdot \omega \approx 43 Nm \cdot 3000 \cdot \frac{2\pi}{60} \approx 13{,}5\ kW$$

En total, s'estarien desenvolupant 27 kW, només un 32% aproximadament del total permès.

Aquests resultats són intuïtius del potencial del motor, treballant en condicions òptimes. Cal tenir en compte que el motor, malgrat possibles aspectes constructius i tèrmics (per això es tracta d'un prototipus amb canal de refrigeració), pot treballar per sobre d'aquestes condicions, arribant a proporcionar, amb la tensió d'alimentació de bateries dissenyada, 40 kW de potència cadascun, com es pot veure a la Figura afegida a l'***Annex I***. Aquesta figura representa la corba potència-velocitat del motor treballant a tensió nominal i a 400 V.

S'observa que treballant als 400 VAC, es pot arribar a obtenir una potència de quasi 40 kW per motor. En canvi, a tensió nominal s'obté un màxim de 23 kW aproximadament, el que implica en condicions nominals, un valor semblant al determinat anteriorment.

Finalment, els paràmetres propis del motor i necessaris per a implementar el control del mateix (L_{qd}, R_s i K_λ) es determinen a través d'unes proves experimentals fora de l'abast del projecte [2].

5.3. Integració en el vehicle

5.3.1. Localització i Package

Un dels punts principals en el disseny del tren de potència és aconseguir una integració viable en el sistema general del vehicle, que faci el conjunt el més compacte possible, reduint les dimensions globals i aconseguir un funcionament òptim per les diferents proves.

A la *Figura 5.10* es pot veure la localització dels motors junt amb la transmissió per corretja utilitzada, en una vista de la planta del vehicle. S'utilitzen dos motors Mavilor MA 55WC els quan es troben alineats i collats a un suport que els subjecta al xassís i al fons pla del vehicle.

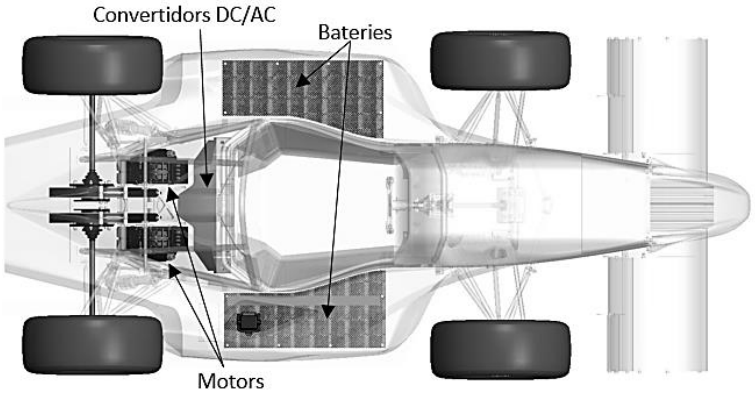


Figura 5.10 Localització dels elements principals del Tren de potència

En el disseny del tren de potència, al mantenir tant els motors com els convertidors DC/AC del cotxe anterior (CAT 06e), les variacions en la disposició estan limitades, donat que el cablejat de les fases del motor que van connectades als inversors, està acotat a unes mides, així com el cable del resolver. Aquest fet suposa que la col·locació dels motors sigui fixa a un lloc del fons pla.

Els motors subjectats pel suport que es veu a la *Figura 5.11*, porten unes politges situades a l'eix de sortida, que transmeten el moviment a la transmissió a través del sistema per corretja que els uneix. La transmissió s'uneix a les rodes a través d'un eix, pel qual transmet el moviment provinent dels motors.

Figura 5.11 Transmissió (esquerra) i Motors i subjecció (dreta) dissenyats amb SolidWorks

Els motors a part d'anar collats al xassís i al fons pla a través d'aquest suport, estan connectats a altres elements a través de tres punts: cable de control del resolver, els cables de potència corresponents a les tres fases que connecten els motors amb els convertidors DC/AC i els tubs de refrigeració per aigua que uneixen els motors amb el radiador de dissipació de calor.

El cable del resolver utilitzat (Cervi cervitronic YY) permet disposar dels senyals de sinus i cosinus que el propi resolver genera i que són utilitzats per a realitzar el càlcul de posició del rotor, necessari pel control dels motors. Aquest s'alimenta a 24 V des del interior dels inversors.

El cablejat de potència utilitzat per alimentar els motors (Cervi VV-K) està compost per 4 cables de 4 mm^2 cadascun (les tres fases i el terra), els quals es troben recoberts per un cobertura de PVC que serveix de protecció. Aquest cable suporta tensions per sobre de la màxima que per normativa es pot tenir al cotxe (600 V), per tal d'assegurar el correcte funcionament de manera prolongada. El terra es connecta a la carcassa d'alumini dels inversors, la qual es troba connectada al xassís del cotxe, per tal de tenir un terra comú, el propi cotxe (establert per Normativa).

El tercer punt de connexió dels motors són els tubs de refrigeració al radiador.

5.3.2. Refrigeració

A través de les simulacions realitzades amb SolidWorks [[4] i amb els tests sobre bancada, es proven diferents situacions per veure el grau de necessitat de la refrigeració per aigua en el motors. Cal tenir en compte, que el sistema motor-refrigeració utilitzat és el mateix que al CAT 06e, però considerant la millora realitzada sobre el control dels motors, es determina que la potència a extreure serà major i per tant, la dissipació de calor també augmentarà, el que implica un escalfament més pronunciat.

Les simulacions realitzades amb el programa SolidWorks, són fetes amb un parell mig de 55 Nm, un valor per sobre del parell nominal dels motors. Tenint en compte aquest paràmetre i la constant de

parell K_t del motor, es determina la intensitat per poder conèixer la potència perduda en forma de calor per efecte Joule, en base a la resistència dels debanats estatòrics.

$$P_p = R \cdot I^2 = 0{,}2 \cdot (55/0{,}84)^2 = 857{,}4\ W$$

Aquest valor correspon a una fase del motor, al qual s'aplica un factor de seguretat de 1,5, obtenint una potència a dissipar per fase de 1286,1 W.

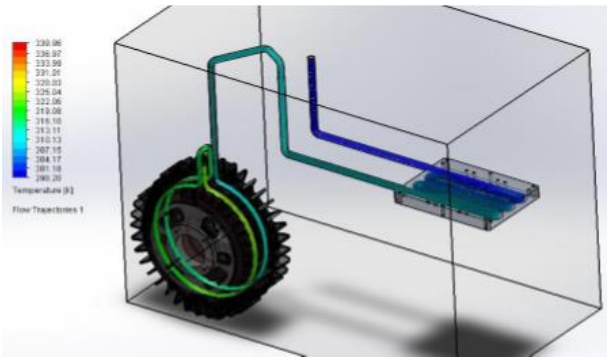


Figura 5.12 Simulació de la temperatura de l'aigua de refrigeració

A la *Figura 5.12* s'aprecia que amb la condició de pèrdues definides, la temperatura màxima de l'aigua és d'uns 52 ºC.

A més, es realitza la simulació sobre el contorn del motor, com es pot veure a la *Figura 5.13*, per poder conèixer les temperatures assumides per aquest, treballant sota les condicions abans establertes. Mitjançant aquestes simulacions es determina la del sistema de refrigeració.

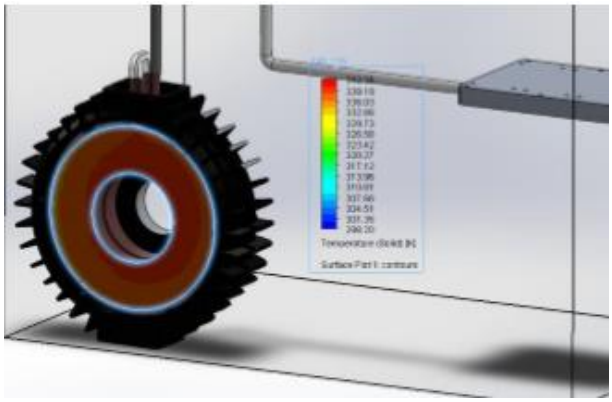


Figura 5.13 Simulació de les temperatures adquirides pel motor

S'aprecia un màxim d'uns 66 ºC, treballant de manera contínua a aquest parell, per tant, es pot considerar que el dimensionament d'aquesta refrigeració és correcte i suficient.

Per tal de garantir la necessitat de la refrigeració, es realitzen algunes proves reals en bancada, sense l'ús del sistema de refrigeració i veient el comportament real de la màquina elèctrica. Les dues proves crítiques que permeten prendre la decisió d'utilitzar la refrigeració són:

1) Posar el motor a treballar de manera contínua al voltant del parell nominal, a unes 1500 rpm durant un període de 10 minuts aproximadament.
2) Posar el motor a treballar a uns 90 A i veure a través de la càmera tèrmica com anava augmentant la temperatura.

Mitjançant aquestes proves, la càmera i uns sensors exteriors de temperatura en forma d'etiqueta col·locats sobre la carcassa del motor, s'observa, com es veu a la *Figura 5.14*, que certs punts de la part exterior del motor es posen a 65 ºC. Aquesta temperatura, a través de la fitxa tècnica del motor, implica una temperatura interna dels debanats propera als 150 ºC. Tenint en compte, que és un motor classe F, no es poden assolir temperatures superiors a aquesta durant un període massa elevat.

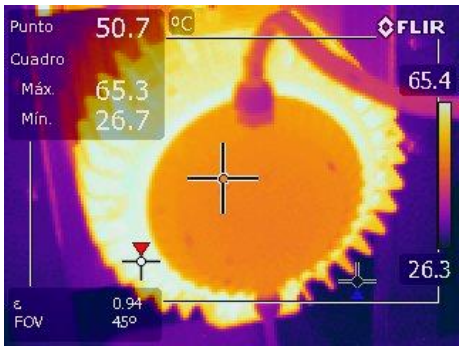


Figura 5.14 Captura de la distribució de temperatures a la carcassa del motor

Tenint en compte els aspectes millorats en el control i en general en el sistema elèctric, l'augment de potència a extreure fa que les temperatures assolibles, requereixin d'aquesta refrigeració com a factor de seguretat ja que la disposició dels motors a la part del darrere, coberts per la carrosseria del vehicle, evita una entrada d'aire per convecció natural significativa. Per tant, malgrat que les proves fetes en bancada no contaven amb la possible refrigeració per aire generada amb el cotxe en moviment, els resultats obtinguts a les proves així com a les simulacions realitzades, determinen la disposició d'una refrigeració composada per un radiador i un sistema de tubs que distribueixen l'aigua freda i calenta pel conjunt motors i convertidors.

A l'***Annex C***, es troba el desenvolupament en equacions del model de motor i a l'***Annex D***, algunes determinacions mecàniques i de potència d'aquest.

6. Convertidors DC/AC

El convertidor DC/AC és un element obligatori segons la Normativa de Formula Student [1], la qual estableix com a prohibició, la connexió directa entre les bateries i els motors.

En el cas del CAT 07e s'incorporen uns inversors dissenyats i construïts per un exmembre de l'equip [2], que va participar en els projectes CAT 05e i CAT 06e. Aquest convertidor permet transformar el corrent continu de bateries en corrent altern, per alimentar els motors síncrons d'imants permanents emprats i, a més, controla aquests a través del codi implementat en els microprocessadors, on es defineix el mètode utilitzat: FOC o Control Vectorial.

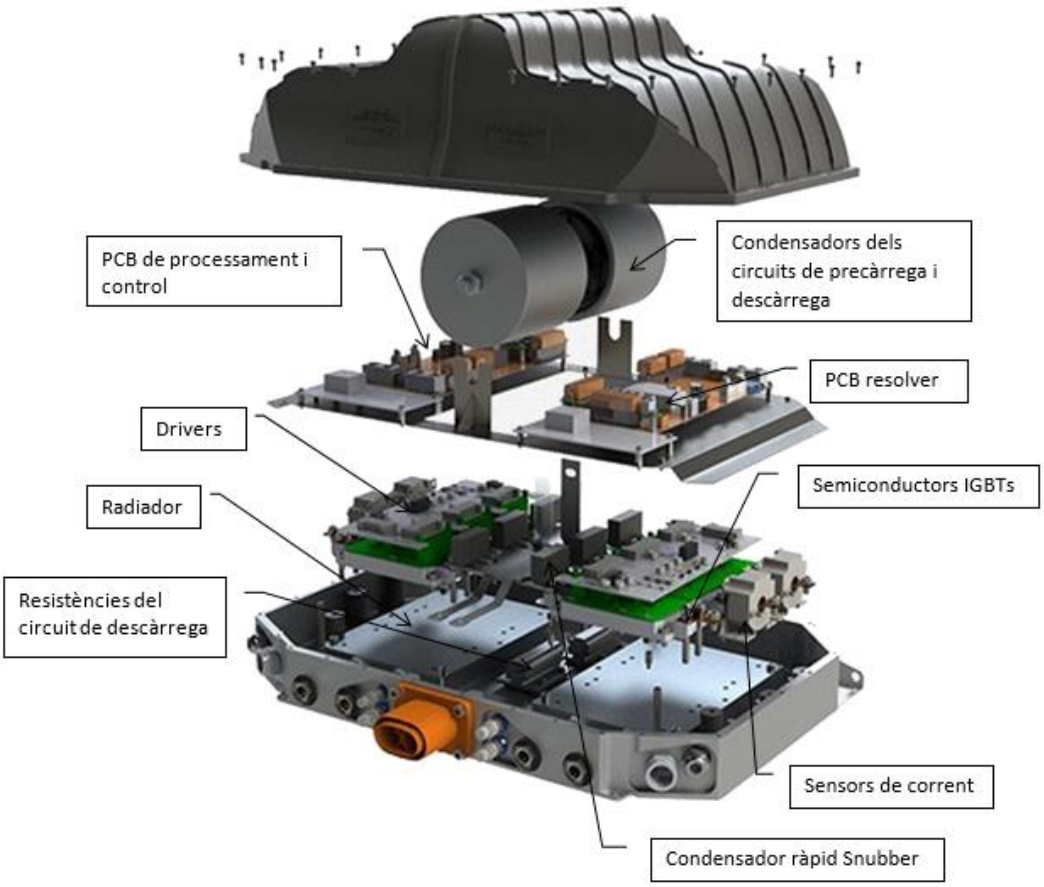


Figura 6.1 Estructura del convertidor DC/AC del CAT 07e

6.1. Descripció

Els inversors utilitzats s'estructuren en tres parts principals:

- Control. Composat per les plaques de circuit imprès (PCB) i els microprocessadors.
- La separació i aïllament de la part de processament de la de potència. Els drivers.
- Potència. Composat pels semiconductors (IGBTs).

A més d'aquests tres blocs, el convertidor disposa d'altres elements, alguns dels quals es poden apreciar a la *Figura 6.1*: sondes de tensió i corrent, que proporcionen lectures necessàries pel control i actuen com element de protecció, els condensadors del bus de contínua, el circuit de descàrrega, les plaques de circuit imprès corresponents al control i processament de les senyals provinents del resolver i els radiadors necessaris per dissipar la calor generada en pèrdues de commutació i conducció dels semiconductors, principalment.

Les plaques per al processament dels senyals del resolver (*Figura 6.2*) s'alimenten a 24 V. Aquestes utilitzen els senyals de sinus, cosinus i de referència que genera aquest element acoblat al motor, per poder conèixer la posició absoluta en cada instant del rotor, a través d'una part del control analitzada a l'apartat 7. Aquests senyals són tractats i s'envien al terminal d'entrades analògiques de la PCB principal, per tal d'utilitzar-los en l'estimació de la posició i en el control dels motors.

Figura 6.2 Placa del resolver al convertidor DC/AC

El resolver es defineix com un transformador elèctric giratori, que proporciona uns senyals enviats a les plaques de circuit imprès. L'estructura simplificada d'un resolver es pot veure a la *Figura 6.3*. Consta de tres debanats: dos situats a 90º l'un de l'altre que fan d'estator i un que fa la funció de rotor (debanat d'excitació). La bobina situada al rotor (N espires) s'alimenta amb tensió alterna V_{ref} de freqüència f_{ref}, que fa la funció de portadora. Sobre les dues bobines situades perpendicularment entre elles (N/2 espires cadascuna) s'indueixen les tensions V_1 i V_2, que corresponen al senyal de referència (portadora)

modulades amb el sinus i cosinus de l'angle mecànic girat θ. Els senyals enviats a la placa per a la determinació de la posició, es generen segons l'angle θ entre la bobina que gira i les dues fixes, sent el màxim quan V_1 o V_2 sigui igual a V_{ref}, com es veu a la *Figura 6.3* [5].

$$V_{ref} = \hat{V}_{ref} \sin(\omega_{ref} t) \quad \textbf{(6.1)}$$

$$V_1 = \hat{V}_{ref} \sin(\omega_{ref} t) \cdot 0.5 \sin(\theta) \quad \textbf{(6.2)}$$

$$V_2 = \hat{V}_{ref} \sin(\omega_{ref} t) \cdot 0.5 \cos(\theta) \quad \textbf{(6.3)}$$

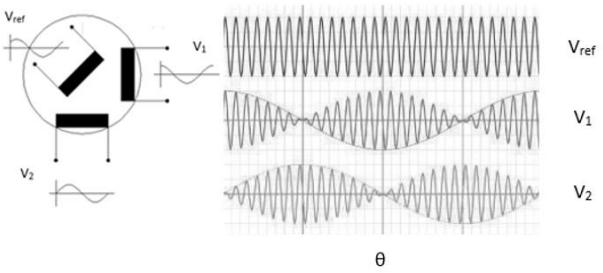


Figura 6.3 Esquema i senyals del resolver

Respecte les sondes de tensió i corrent, són elements necessaris en el control d'un sistema o planta com aquest, ja que permeten disposar dels valors donats en cada instant i conèixer les variables principals en cada situació. A més, són un element de protecció indirecte ja que les lectures que proporcionen, s'utilitzen per a establir els límits de certes alarmes, i per tant, ajuden a garantir el bon funcionament del conjunt, evitant que es facin malbé molts elements del mòdul, en cas d'error durant la seva utilització.

S'utilitzen dues sondes de corrent per a cada convertidor DC/AC, per conèixer dues de les tres intensitats d'alterna que alimenten els motors i que surten dels inversors. Aquests valors són necessaris per al tipus de control utilitzat, com es veurà a l'apartat 7. Amb dos dels tres corrents és suficient, ja que el tercer es pot determinar a partir de la següent expressió:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0 \quad \textbf{(6.4)}$$

Són sondes d'efecte Hall i de llaç tancat, el funcionament de les quals, es basa en la càrrega elèctrica que es desplaça pel cable (intensitat a mesurar) i que al passar per la sonda, genera una diferència de tensió, gràcies al camp magnètic existent en la pròpia bobina d'aquesta. Mitjançant el valor de la tensió, la sonda proporciona el valor del corrent que està circulant pel conductor.

Les utilitzades es poden veure a la *Figura 6.4* i corresponen al model LEM LF 205-S/SP3. La taula d'especificacions es troba a l'***Annex I***.

A més, s'ha utilitzat una sonda de tensió d'efecte Hall per conèixer la tensió continua del bus (al costat DC del convertidor). El model emprat es pot veure a la *Figura 6.4* i correspon al model LEM LV 25-600. La taula d'especificacions es troba a l'***Annex I***.

Les sondes es seleccionen per a un rang de mesura per sobre del màxim que es pot donar, en magnituds de tensió i corrent (donant un marge de seguretat) en el tren de potència del cotxe.

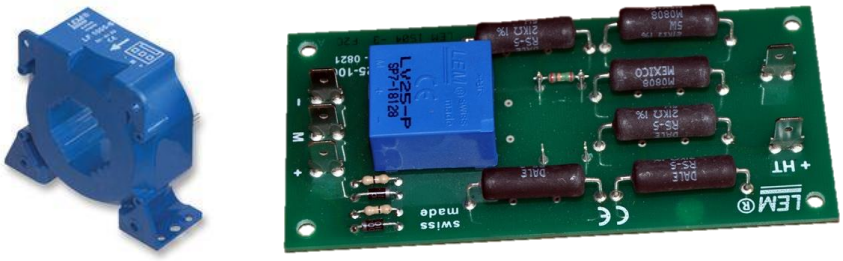


Figura 6.4 Sondes de corrent (esquerra) i de tensió (dreta)

A continuació, es descriuen de manera específica els tres blocs principals del convertidor DC/AC.

6.1.1. Part del control

És la part del convertidor que s'encarrega de processar els diferents senyals rebuts, per exemple, dels sensors de tensió i corrent o dels resolvers dels motors. Les plaques de circuit imprès (corresponen a la *Figura 6.5*) s'alimenten a 24 V, provinents de la bateria de baix voltatge de la centraleta electrònica principal del vehicle. Inclouen uns microprocessadors on queda guardat tot el codi implementat, per tal d'aconseguir un correcte funcionament del tren de potència i un bon control dels motors.

Aquestes PCBs es caracteritzen per disposar de: entrades aïllades de comunicació CAN, connector d'interfície USB JTAG, que permet la comunicació directe amb el programa editor de codi, convertidors de digital a analògic (DAC) amb punts de contacte per visualitzar diferents senyals a través d'oscil·loscopi i punts d'entrades digitals i analògiques provinents de les sondes i sensors, a més del processador digital de senyals (DSP).

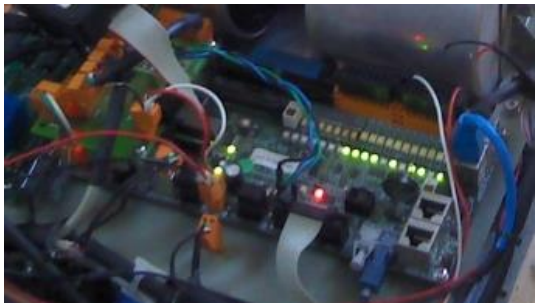


Figura 6.5 PCB principal del convertidor DC/AC

El programa utilitzat per a implementar el codi i control del tren de potència dins del DSP (TMS320F2809), és el *Code Composer Studio*. El control s'implementa en una de les interrupcions pròpies del processador digital, la interrupció de l'ADC. Per tant, es realitza la conversió dels senyals analògics rebuts a digitals, per tal d'utilitzar-los en el control dels motors. La freqüència de treball de la interrupció és 32 kHz. Inclou el codi corresponent al càlcul de la posició del rotor (4 kHz de freqüència) i el control dels motors (8 kHz de freqüència), amb les transformades i càlculs associats.

Altres aspectes importants a destacar respecte al codi introduït al DSP, és la inicialització de les variables corresponents als diferents punts del control (constants proporcionals i d'integració dels controladors PI, paràmetres dels motors, ajusts dels canals de lectura de les sondes, etc.), realitzades al fitxer Init_Vars, la definició dels estats que es poden donar al vehicle i de les diferents alarmes i advertències, realitzades al fitxer Grafcet. A la *Figura 6.6*, es poden apreciar les diferents freqüències de treball del processament del control implementat:

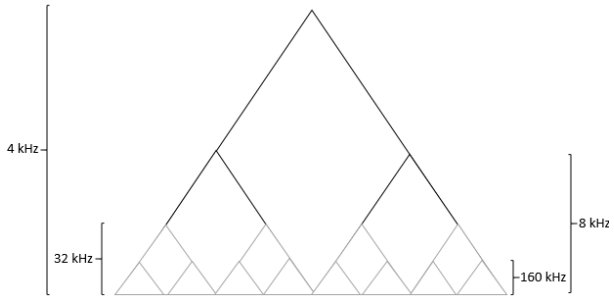


Figura 6.6 Esquema de les freqüències de treball del codi implementat

L'estimació de la posició del rotor es realitza a 4 kHz, a través dels senyals enviats pel resolver. El càlcul i execució del control del motor es realitza a 8 kHz. Aquesta freqüència inclou els PWM encarregats de fer commutar els mòduls d'IGBTs i algunes de les proteccions definides. A 32 kHz treballa la Interrupció de l'ADC. Finalment, a 160 kHz treballa el senyal SPWM corresponent al resolver.

6.1.2. Drivers

Com s'ha esmentat anteriorment, els drivers són l'element de cohesió de la part de control (baix voltatge) i la part de potència (alt voltatge), dins del convertidor DC/AC per al seu correcte funcionament. La seva funció principal és la d'aïllar elèctricament el processament de la potència. Són els encarregats de la commutació dels IGBTs, a partir dels senyals de dispar enviats des del processador. Aquests corresponen als temps de branca per a cadascuna de les fases.

Disposen de circuits integrats específics, per cobrir el rang principal de funcions requerides i enviar als semiconductors els senyals intel·ligents de porta. Aquests circuits (ASICs) supervisen totes les accions, afegint temps morts entre commutacions d'un IGBT i el complementari de la mateixa branca, evitant així la coincidència en un mateix estat, el que suposaria un mal funcionament o curtcircuit. Gestionen els errors, les tensions d'alimentació interna i controlen els voltatges entre col·lector i emissor, per evitar possibles problemes com el mencionat anteriorment [10].

El driver conté els components necessaris per a un òptim i segur control dels mòduls IGBTs: resistències de porta petites, per minimitzar les pèrdues per commutació, díodes com a protecció de sobretensions, monitorització de la tensió col·lector-emissor (protecció contra curtcircuits), components per ajustar el temps de resposta, els temps morts abans esmentats, etc.

Figura 6.7 Driver 2SP0115T

6.1.3. Part de potència

És la part dels convertidors unida directament a les fases del motor. Com es pot veure a la *Figura 6.8*, cada mòdul disposa de dos semiconductors que estan connectats a una fase dels motors. La seva funció és generar l'ona d'alterna amb una certa freqüència, per alimentar els motors trifàsics síncrons, mitjançant impulsos sobre un dels seus terminals (porta o base), els quals venen marcats pel control establert (analitzat a l'apartat 7) que defineix el períodes d'obert i tancat de les tres branques de cada convertidor DC/AC.

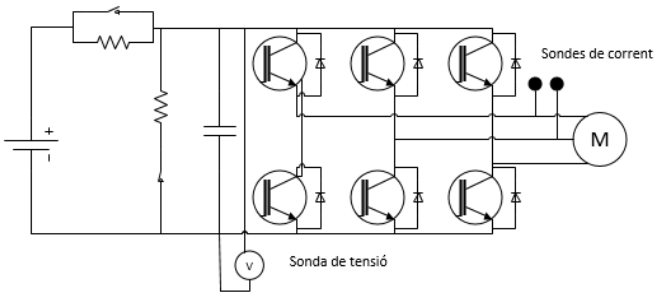


Figura 6.8 Esquema de l'inversor amb circuits de precàrrega, descàrrega i sondes de tensió i corrent.

Dins dels semiconductors [6], es troben tres tipus principals de transistors de potència (utilitzats com a interruptors) que tenen l'avantatge de ser totalment controlats i que són els més adequats per a l'aplicació definida:

- BJT (*Bipolar Junction Transistor*).
- MOSFET (*Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor*).
- IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

El terminal de control (base o porta) es dissenya, en aspectes de potència, per a fer treballar el transistor a la zona de saturació (conducció) o de tall (bloqueig). La forma d'actuació sobre aquest terminal és un aspecte que diferencia el funcionament dels transistors BJT i MOSFET. En el primer, cal injectar un corrent de base I_B per regular la intensitat de col·lector, i en el segon, el control es basa en l'aplicació d'una tensió entre porta i sortidor V_{GS}. Ambdós transistors comparteixen una característica: la quantitat de potència consumida pel terminal de control (porta o base) és inferior a la que es consumeix en els altres dos terminals de cada tipus.

En els convertidors DC/AC del vehicle elèctric CAT 07e, s'han utilitzat transistors IGBT (escollits en el disseny i muntatge dels inversors pel CAT 06e) ja que per característiques i avantatges, és un transistor de potència que uneix propietats dels BJT i MOSFET [6]:

- La porta està aïllada del dispositiu i això simplifica el control com als MOSFETs, treballant amb tensió (facilitat de dispar).
- La conducció entre col·lector i emissor és del tipus BJT, el qual dóna una capacitat de conducció d'elevats corrents amb baixa caiguda de tensió, és a dir, presenta una resistència de conducció baixa, el que implica unes pèrdues menors.
- Temps de commutació baixos, el qual implica altes freqüències de funcionament.
- La combinació del treball amb tensions i corrents significatius fa que el rang de potències a les quals pot treballar sigui elevat.

Aquesta combinació mitja de prestacions, permet reduir la mida i millorar les prestacions dels convertidors. Altres tecnologies com el GTO es caracteritzen per una única gran propietat, elevada potència amb baix rang de freqüències de treball. A la *Figura 6.9* es pot veure un gràfic comparatiu d'algunes tecnologies aplicables [6[16].

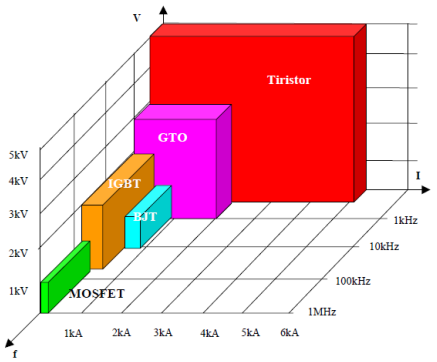


Figura 6.9 Gràfic comparatiu de diferents semiconductors

Els IGBTs disposen d'unes característiques, que des del punt de vista del vehicle i en magnituds elèctriques, són òptimes per al correcte funcionament del tren de potència. A la *Taula 6.1* es poden apreciar alguns paràmetres corresponents a les tres tecnologies, amb els quals es pot veure que a nivell de tensió màxima i corrent, està per sobre del requerit i respecte les freqüències de treball, és capaç d'assumir les magnituds definides.

Característica	BJT	MOSFET	IGBT
Polaritat	Unidireccional	Unidireccional	Unidireccional
Tipus de dispar	Per corrent	Per tensió	Per tensió
Complexitat circuit de dispar	Alta	Baixa	Baixa
Tensió màxima	1,2 kV	1 Kv	2 kV
Intensitat màxima	750 A	100 A	500 A
Freqüència màxima	10 kHz	1 MHz	80 kHz
Rang de potències	Mig	Baix (<10 kW)	Mig-Elevat

Taula 6.1 Comparativa d'especificacions dels transistors de potència

Aquest tipus de transistor de potència disposa de terminal de control porta com el MOSFET, el que implica una alta impedància d'entrada, i de dos terminals iguals als BJT: col·lector i emissor. El dispositiu

té una estructura interna molt semblant al MOSFET (NPN), però constituït per un substrat P addicional que forma el col·lector de l'IGBT i fa que estigui constituït per tres unions PN i quatre capes alternades PNPN com s'observa a la *Figura 6.10* [16]. La regió N- té la conductivitat modulada per la injecció de portadors minoritaris (forats) a partir de la regió P+, quan J_1 es polaritza directament. Una major conductivitat d'aquesta zona, redueix la caiguda de tensió produïda. La màxima tensió que pot suportar el transistor ve determinada per les unions J_2 i J_1.

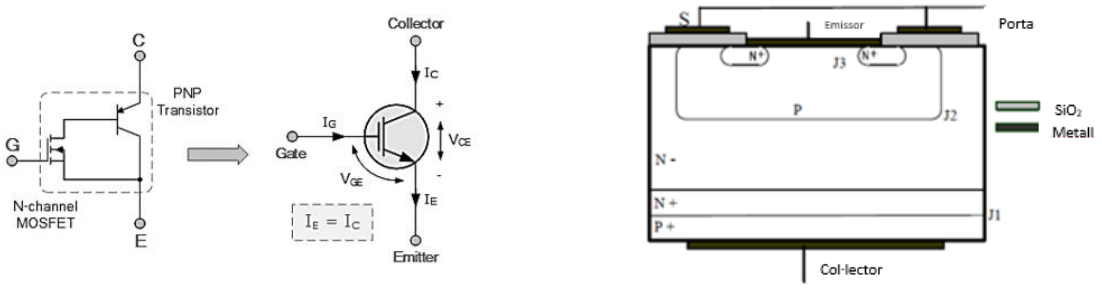


Figura 6.10 Esquema electrònic i símbol (esquerra) i esquema intern (dreta) d'un IGBT

A la *Figura 6.11* [16] es mostra la corba característica de l'IGBT. Com s'ha esmentat anteriorment, presenta una alta impedància d'entrada, com el MOSFET i baixes pèrdues de conducció, com el BJT. Quan s'aplica una tensió V_{GE} a la porta (aproximadament 15 V), l'IGBT s'encén immediatament, circula el corrent de col·lector I_C i la tensió V_{CE} se'n va del valor de bloqueig a zero. La intensitat I_C persisteix durant el període de conducció (t_{on}), és a dir, mentre es manté el voltatge V_{GE}. Per a l'encesa del transistor, el terminal col·lector ha de ser polaritzat positivament respecte el terminal emissor amb un valor positiu de V_{GE}. L'IGBT passarà a estat de bloqueig (t_{off}) quan es deixi d'aplicar la tensió de control V_{GE}. La transició entre t_{on}i t_{off} és molt ràpida, segons la magnitud de freqüència de commutació del transistor (de l'ordre de microsegons). El pas dels estats OFF a ON i de ON a OFF requereixen d'un valor llindar V_{TH} (valor proper a 4 V), en el qual, la tensió de control aplicada ha de superar o quedar per sota respectivament, perquè es produeixi la transició.

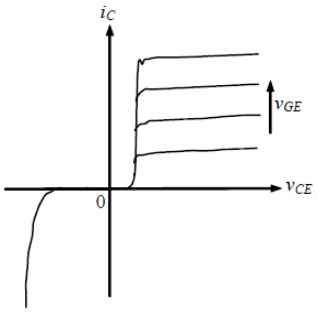


Figura 6.11 Corba I-V de l'IGBT

Finalment, es decideix el model de IGBT utilitzat en el convertidor DC/AC per a les temporades corresponents al CAT 06e i CAT 07e [2]. Els aspectes a tenir en compte són el cost, els elements paràsits que es puguin generar afectant al funcionament i la potència dissipada. L'últim influeix directament en la eficiència de l'inversor, sobretot tenint en compte les freqüències de commutació a les que hagi de treballar. Per tant, és molt important tenir en compte les pèrdues produïdes i la evacuació d'aquestes, per tal de garantir un correcte funcionament del conjunt.

A través dels paràmetres dels motors, així com de les bateries i la seva configuració (Apartat 8), es poden definir una sèrie d'especificacions per al disseny del convertidor i per tant, de les característiques necessàries dels transistors, com es pot veure a la *Taula 6.2*, on es presenten uns valors d'intensitat nominal i potència sobredimensionats (amb un factor de seguretat) del disseny.

Característica	Valor
$V_{dc,nominal}$	518 V
$V_{dc,màx.}$	588 V
$V_{dc,mín.}$	420 V
$I_{ac,màx.}$	150 A_{rms}
$I_{ac,nominal}$	43 A_{rms}
$P_{màx.}$	50 kW
$P_{nominal}$	20 kW

Taula 6.2 Especificacions del convertidor DC/AC

Tenint en compte els aspectes abans comentats, al definir l'IGBT utilitzat, s'analitzen diferents opcions de mercat, aptes per a les necessitats del sistema elèctric. A l'***Annex I***, es pot veure una taula amb els models analitzats per a la selecció final [2], els quals tenien característiques similars. Segons la seva disponibilitat en el mercat, dimensions, rang de freqüències de treball i les pèrdues produïdes en casos crítics de treball (mètode de càlcul analitzat a l'aparatat 6.2.2), s'escull el model Fuji [2] (comparativa del càlcul de pèrdues, segons diferents sol·licitacions a l'***Annex I*** [2]). Algunes de les especificacions del model es poden veure a la *Taula 6.3*:

Característica	Valor
Tensió col·lector-emissor	1200 V
Tensió porta-emissor	20 V
Corrent de col·lector	225 A
Temperatura màxima de la unió	175 ^{o}C
Temperatura màxima de la unió en condicions de commutació	150 ^{o}C
Temperatura de la capsa	125 ^{o}C
Resistència tèrmica unió-capsa	0,14 ^{o}C/W

Taula 6.3 Especificacions del mòdul d'IGBTs Fuji 2MBI225VN

A partir de les especificacions de l'IGBT de la *Taula 6.3*, s'afirma que els transistors de potència estan sobredimensionats de manera correcte des del punt de vista elèctric, per suportar tensions i corrents de treball màxims pel sistema elèctric emprat. A més, es disposa dels paràmetres necessaris per garantir el disseny des del punt de vista tèrmic (apartat 6.2.2).

6.2. Integració en el vehicle

6.2.1. Localització i Package

Com s'ha comentat a l'apartat 5.3, un dels punts principals en el disseny del tren de potència és que el conjunt estigui incorporat en el vehicle d'una manera funcional i compacte, per facilitar d'aquesta manera aspectes relacionats a la dinàmica i aerodinàmica del cotxe. L'altre objectiu principal de la integració és aconseguir un funcionament òptim intentant eliminar o reduir els problemes que siguin possibles.

A la *Figura 5.10* es pot veure la localització dels convertidors DC/AC. La seva disposició en el CAT 07e queda restringida, donat que s'utilitza el mateix conjunt inversors-motors del CAT 06e i l'empaquetat format per transmissió, estructura principal, suspensions de darrere, etc. limiten l'espai i opcions de integració dels elements elèctrics a la part del darrere del monocasc. Per tal de no modificar les longituds del cablejat entre ambdues parts, així com els mètodes de subjecció, es col·loquen els convertidors al vehicle de la mateixa manera que al seu predecessor.

Els convertidors es troben empaquetats dins d'una carcassa (*Figura 6.12*), la qual està feta de dos materials diferents: la base d'alumini, per fer servir un material lleuger i alhora de bones prestacions, i

una tapa fabricada per addició de capes (*Ràpid prototyping*), la qual no proporciona grans propietats, però és una tècnica ràpida i de precisió utilitzada ja que aquesta part no suporta grans sol·licitacions mecàniques.

La base d'alumini té com a objectiu principal, fixar interiorment els components i unir els convertidors al xassís del cotxe, a més de protegir tot els components instal·lats al seu interior. Els inversors disposen de 4 punts de subjecció al xassís, els quals ajuden al compliment d'un punt de la Normativa: establiment d'un únic terra comú a tot el vehicle, el propi cotxe.

Un dels aspectes més crítics al voltant dels inversors, són les emissions electromagnètiques. Aquest fet afecta al bon funcionament del sistema elèctric i electrònic amb la generació de *soroll* que pot produir males lectures o imprecisió en els càlculs realitzats pel conjunt. Malgrat aquest problema, el disseny de l'empaquetat ho té en compte ja que interiorment, disposa d'una xapa metàl·lica, com es pot veure a la *Figura 6.1*, que junt amb la carcassa exterior d'alumini, tanca els drivers i semiconductors (principal font de generació d'EMIs) formant una gàbia de Faraday que intenta aïllar les PCBs encarregades del control i processament de senyals, per minimitzar el màxim possible els efectes perjudicials de les interferències.

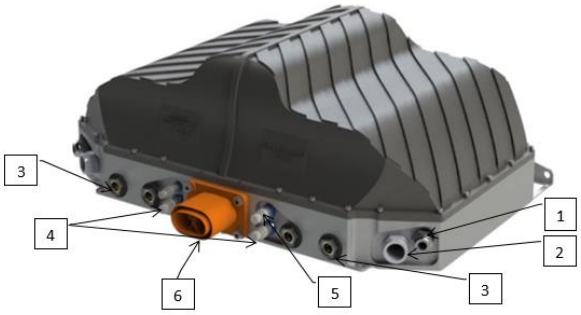


Figura 6.12 Carcassa dels convertidors DC/AC

Com es pot veure a la *Figura 6.12*, el convertidor disposa de diferents entrades:

- Connexió externa des del programa Code Composer a les plaques de processament per USB (1).
- Entrada de les tres fases i terra d'un motor per a la connexió de cada una de les fases a un mòdul de IGBTs (2).
- 4 conductes de refrigeració: 2 d'entrada d'aigua i 2 de sortida dels radiadors interiors (3).
- Punts de connexió dels cables de resolver integrats als 2 motors, per a la seva connexió interna a la placa de resolver on es processen els senyals enviats (4).

- Un punt de mesura de control i una entrada corresponent a l'alimentació de baix voltatge i comunicació CAN, des de la centraleta principal electrònica (dSPACE) (5).
- Connexió d'alt voltatge. Unió de bateries amb els inversors. Entrada de la tensió Vdc (6).

El cablejat corresponent als punts (2) i (4) de la *Figura 6.12* són els explicats a l'apartat 5.3. Els corresponents a (5) de la *Figura 6.12*, són de la tipologia del Cervi cervitronic del resolver, però amb diferent configuració dels pins dels terminals emprats (LEMO).

La diferència es troba en el cable (6) de la *Figura 6.12*, que transmet el corrent de bateries a inversors, perquè aquests posteriorment el transmetin als motors. Es tracta d'un model ASCABLE Pirofren SZ1-K 0.6/1 kV de 25 mm^2. A l'***Annex I***, es poden apreciar alguna de les seves característiques. És un dels cables més crítics, i per això, en el disseny es sobredimensiona vers les prestacions requerides, per garantir el funcionament i evitar problemes de la zona que treballa a voltatge més elevat i crític. A més, la disposició limitada dels inversors, dificulten l'accés i manipulació del cable un cop connectat, fet tingut en compte al dissenyar-lo.

Finalment, els punts corresponents a (3) de la *Figura 6.12* corresponen a les entrades d'aigua freda i sortides d'aigua calenta dels tubs del sistema de refrigeració comú de motors i inversors.

6.2.2. Refrigeració

Els convertidors, com s'ha comentat a l'apartat 5.3.2, disposen d'un sistema de refrigeració conjunt amb els motors. Aquest sistema està forma per un radiador subjectat al xassís del vehicle, un sistema de tubs i una bomba que impulsa l'aigua a través d'aquests tubs amb la suficient pressió, com per superar les caigudes de pressió i pèrdues de càrrega del circuit. El conjunt està dividit en dos circuits simètrics: cada un refrigera un motor i un inversor. Aquests tubs es connecten als terminals (3) dissenyats a la carcassa de la *Figura 6.12*. Interiorment, els tubs passen a través de dos intercanviadors (un per a cada convertidor) que reben l'aigua freda dipositada al radiador exterior i l'escalfen per conducció, amb la calor dissipada pels transistors.

D'aquesta manera, el que es desitja és que els convertidors no siguin un limitant a nivell tèrmic en la cadena de potència.

Per al dimensionament dels radiadors interns dels convertidors [2], cal tenir en compte la potència a dissipar pels transistors en els casos més crítics que es puguin donar i la resistència tèrmica pròpia del intercanviador de calor.

Tenint en compte les pèrdues que es poden produir, la resistència tèrmica és el paràmetre d'estudi, ja que la seva minimització farà que els gradients tèrmics entre la temperatura ambient i la del dispositiu siguin menors, segons l'equació:

$$T_h = T_a + P_{p,convertidor} \cdot R_{th} \quad \textbf{(6.5)}$$

L'intercanviador utilitzat és el model MQT1914 de *Max Technology*. Com indica el fabricant, la resistència tèrmica depèn del flux del fluid de refrigeració (aigua destil·lada) i aquest flux és funció de la caiguda de pressió produïda als components del circuit. Mitjançant aquestes dades, es procedeix al càlcul de la potència perduda per commutació i conducció en els convertidors, per tal de garantir unes temperatures dins del rang marcat pel fabricant dels IGBTs i així, confirmar que no és un limitant del tren de potència. Les expressions utilitzades pels càlculs següents [7] es troben a la l'***Annex B***.

Per l'IGBT:

$$\mathrm{P_{conducció}} = \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{0{,}94 \cdot 1}{8}\right) \cdot 0{,}5 \cdot 130 + \left(\frac{1}{8} + \frac{0{,}94 \cdot 1}{3\pi}\right) \cdot 0{,}0088 \cdot 130^2 = 51{,}4\ \mathrm{W} \quad \textbf{(6.6)}$$

$$\mathrm{P_{commutació}} = 8000 \cdot (8 + 25) \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi}\frac{130}{200} \cdot \left(\frac{600}{600}\right)^{1{,}3} \cdot \left(1 + \mathrm{TC_{Esw}} \cdot \underbrace{(\mathrm{T_j} - \mathrm{T_{ref}})}_{0}\right) = 77{,}2\ \mathrm{W} \quad \textbf{(6.7)}$$

Per el díode:

$$\mathrm{P_{conducció}} = \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{0{,}94 \cdot 1}{8}\right) \cdot 0{,}5 \cdot 130 + \left(\frac{1}{8} - \frac{0{,}94 \cdot 1}{3\pi}\right) \cdot 0{,}007 \cdot 130^2 = 5{,}7\ \mathrm{W} \quad \textbf{(6.8)}$$

$$\mathrm{P_{commutació}} = 8000 \cdot 17 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi}\frac{130}{200}\right)^{0.6} \cdot \left(\frac{600}{600}\right)^{0.6} \cdot \left(1 + \mathrm{TC_{Err}} \cdot \underbrace{(\mathrm{T_1} - \mathrm{T_{ref}})}_{0}\right) = 65{,}1\ \mathrm{W} \quad \textbf{(6.9)}$$

Resultats globals:

$$\mathrm{P_{cond(igbt+D)}} = 51{,}4 + 5{,}7 = 57{,}1\ \mathrm{W} \rightarrow \mathrm{P_{cond(inversor)}} = \mathrm{P_{cond(igbt+D)}} \cdot 6 = 342{,}6\ \mathrm{W} \rightarrow$$
$$\mathrm{P_{cond,total}} = \mathrm{P_{cond(inversor)}} \cdot 2 = 685{,}2\ \mathrm{W} \quad \textbf{(6.10)}$$

$$\mathrm{P_{comm(igbt+D)}} = 77{,}2 + 65{,}1 = 142{,}3\ \mathrm{W} \rightarrow \mathrm{P_{comm(inversor)}} = \mathrm{P_{comm(igbt+D)}} \cdot 6 = 853{,}8\ \mathrm{W} \rightarrow$$
$$\mathrm{P_{comm,total}} = \mathrm{P_{comm(inversor)}} \cdot 2 = 1707{,}6\ \mathrm{W} \quad \textbf{(6.11)}$$

$$\mathrm{P_{inversor}} = \mathrm{P_{cond(inversor)}} + \mathrm{P_{comm(inversor)}} = 1196{,}4\ \mathrm{W} \quad \textbf{(6.12)}$$

$$\mathrm{P_{radiador}} = \mathrm{P_{inversor}} = 1196{,}4\ \mathrm{W} \quad \textbf{(6.13)}$$

$$\mathrm{P_{totals}} = 685{,}2 + 1707{,}6 = 2392{,}8\mathrm{W} \quad \textbf{(6.14)}$$

Mitjançant les pèrdues determinades i les resistències tèrmiques associades a cada element, es poden determinar les temperatures teòriques assumibles en cada cas, definint una referència de temperatura ambient:

$$T_{radiador} = T_a + P_{radiador} \cdot R_{th,radiador} = 40 + 1196{,}4 \cdot 0{,}012 = 54{,}4\ ^\circ C \quad \textbf{(6.15)}$$

$$T_{j,IGBT} = T_{radiador} + \left(P_{cond,igbt} + P_{comm,igbt}\right)\left(R_{th(j-c)}\right) = 54{,}4 + (51{,}4 + 77{,}2) \cdot 0{,}14 \ = 72{,}4\ ^\circ C \quad \textbf{(6.16)}$$

$$T_{j,Diode} = T_{radiador} + \left(P_{cond,D} + P_{comm,D}\right)\left(R_{th,D}\right) = 54{,}4 + (5{,}7 + 65{,}1) \cdot 0{,}18 = 67{,}1\ ^\circ C \quad \textbf{(6.17)}$$

Determinades les pèrdues en forma de calor produïdes i les temperatures a nivell teòric que es donen en els transistors i els radiadors en un cas crític (magnitud d'intensitat elevada), es pot afirmar que el conjunt està dimensionat correctament per al seu bon funcionament des del punt de vista tèrmic, ja que l'element de mes consideració, el transistor de potència, es troba en el cas hipotètic definit a 72 °C aproximadament, una temperatura bastant per sota de la màxima definida pel fabricant.

Per acabar d'assegurar aquest aspecte, es realitzen proves tèrmiques en la bancada de proves i es controlen les temperatures assolides durant aquests tests, com es pot veure a la *Figura 6.13*. Les condicions de treball es basen en realitzar una prova d'un motor contra l'altre, utilitzant un com a motor i l'altre com a generador, tancant el llaç amb els dos convertidors i proporcionant energia a través d'un conjunt de bateries externes. La prova es realitza amb la carcassa dels inversors obertes i treballant en diferents condicions:

- Parell nominal a unes 1500 rpm durant un període d'uns 10 minuts, tenint connectada la refrigeració.
- Treballant a uns 90 A. Tal i com s'ha analitzat a l'apartat 5.3.2, s'aprecia que els motors assolien abans unes temperatures crítiques al treballar l'un contra l'altre.

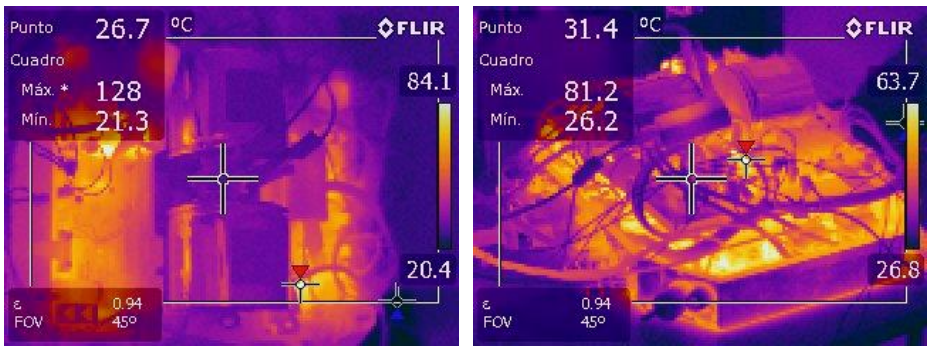


Figura 6.13 Captures de la càmera tèrmica en les proves tèrmiques en bancada

De les captures de la *Figura 6.13* es pot determinar que, malgrat que les temperatures assolides són elevades, es troben dins del rang de treball dels components visibles (condensadors, PCBs, transistors,

resistències, drivers, entre altres) i s'assegura d'aquesta manera el disseny tèrmic dels convertidors DC/AC.

El sistema emprat per a la realització d'aquestes proves es pot apreciar a la *Figura 6.14*. Es basa en un circuit alimentat de la pròpia xarxa, connectada a un convertidor que permet l'ajust, elevació i control de la tensió d'alimentació del bus dels convertidors DC/AC del vehicle elèctric. El muntatge enfronta un motor contra l'altre: alimenta un d'ells amb aquesta tensió provinent de la xarxa, generant potència mecànica al motor, i l'altre rep la potència mecànica i la transforma en elèctrica que es converteix i retorna a la xarxa a través de l'altre inversor, treballant el segon prototipus com a generador.

Per fer funcionar el conjunt, tres consignes són necessàries:

- Ajustar la tensió de contínua d'alimentació del bus del convertidor DC/AC del CAT 07e.
- Ajustar, amb el convertidor del prototipus que actua com a motor, el parell mecànic desitjat.
- Ajustar, amb el convertidor del prototipus que actua com a generador, el valor de la càrrega a la sortida del primer prototipus que simuli una resistència en forma de parell.

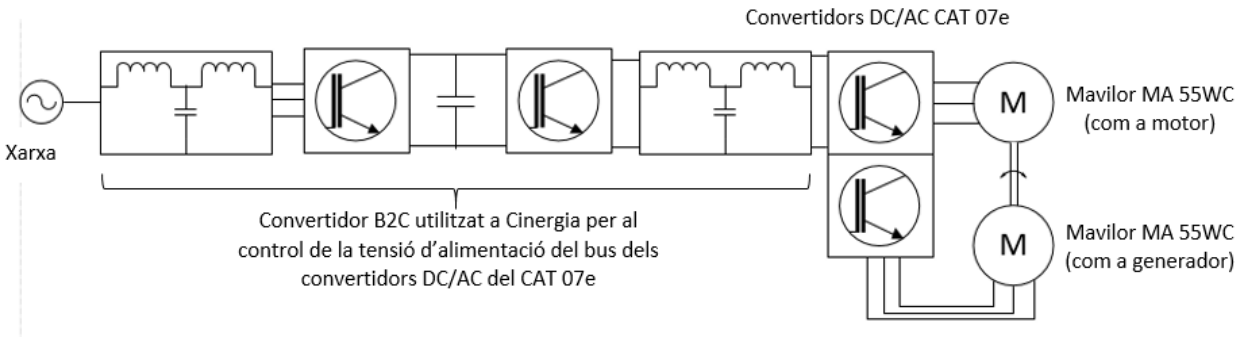


Figura 6.14 Esquema del sistema elèctric emprat en les proves amb els dos motors connectats

6.2.3. Proteccions

Com s'ha esmentat anteriorment, els convertidors, al col·locar-se al vehicle, es tanquen totalment com a mesura de protecció a les vibracions, a partícules que poguessin entrar, al seu propi funcionament o a l'aigua. Aquest fet, fa que l'única font de refrigeració siguin els intercanviadors col·locats en el seu interior. Per això, com a mesura de seguretat, es fixa una alarma de temperatura en el programa implementat al microprocessador amb el programa *Code Composer*. A més d'aquesta, es van definir diferents proteccions a nivell de software (advertències i alarmes) i també elements a nivell físic, els quals es defineixen a continuació i que serveixen de protecció tant per als inversors com per als motors:

- L'alarma de temperatura d'igbt.

Malgrat tenir definides tres alarmes (una per a cada un dels tres mòduls de cada convertidor), la que roman activada és la del mòdul central. Això és perquè aquest mòdul, a més de la calor dissipada per les pèrdues de commutació i conducció pròpies, també rebrà calor de la dissipació dels dos mòduls exteriors, fet que implicarà una major temperatura en el central, sent per tant, el més crític a nivell tèrmic. L'activació d'aquesta alarma es produirà si la lectura de la temperatura del mòdul és més gran que un valor especificat. Al activar-se, el sistema entrarà en estat d'Alarma i es pararà per evitar que cap component es fàcil malbé. A més, el sistema disposa d'una advertència que avisa al pilot durant les proves si es supera una temperatura especificada (uns graus centígrads per sota de la considerada com a límit).

Es destaca que els valors fixats de temperatura límit, fan referència a punts crítics dels motors i no dels transistors, ja que amb les proves tèrmiques s'aprecia que els motors eren més sensibles a augments de temperatura, arribant abans que els transistors a la temperatura màxima fixada pel fabricant.

- L'alarma de protecció contra sobrecorrent.

A través dels canals analògics que llegeixen el valor de corrent de les sondes definides a l'apartat 6.1, es defineix una alarma amb la qual, si es supera el límit de corrent establert al demanar una consigna de parell (el pilot fixa un parell màxim des de la pantalla que té disponible) a través del pedal, el sistema s'atura. Això permetrà no danyar elements dimensionats segons un corrent màxim o fer malbé els motors demanant un parell superior al màxim admissible, fet que provocaria la desmagnetització o problemes mecànics a l'interior del motor.

Definint el límit de corrent per sota del parell màxim realitzable pel motor i tenint en compte que el valor de corrent amb el que es compara és I_q:

$$I_q = \sqrt{2} \cdot \Gamma \quad \textbf{(6.18)}$$

D'aquesta manera el valor màxim de consigna de parell demanada pel pilot es fixa en 100 Nm, això implica:

$$I_q = \sqrt{2} \cdot 100 = 141{,}4\ A \quad \textbf{(6.19)}$$

La diferència fins al LIMIT_CORRENT=160, correspon a un factor de seguretat de 1,13, establert per evitar que el sistema saltés davant el possible soroll del sistema, produït per les interferències electromagnètiques que podien fer variar les lectures de corrent respecte el seu valor real.

- L'alarma de velocitat límit.

El motor, com es va comentar a l'apartat 5, té una velocitat màxima d'aproximadament 6000 rpm, el que implica una freqüència mecànica màxima de 100 Hz, com s'indica a l'equació 5.21. Per tant, aquesta alarma, fa parar el sistema si en algun moment detecta una velocitat superior a la definida en Hertz.

A més d'aquestes tres alarmes destacades, el sistema disposa d'altres, per tal de garantir el correcte funcionament segons diferents paràmetres o estats del sistema. Per un altre costat, el convertidor en el seu interior, disposa de certs elements físics de protecció que ajuden a mantenir l'òptim funcionament durant les diferents proves.

- Drivers i Sondes de tensió i corrent

Analitzats anteriorment a l'apartat 6.1.2, els drivers són els encarregats del control de la commutació dels transistors, aïllen la part de processament i la de potència i disposen de diferents elements de protecció. També explicades a l'apartat 6.1, les sondes són elements de mesura no de protecció, que gràcies a les lectures realitzades es poden controlar, a través del programa, diferents paràmetres amb els que es defineixen les alarmes i límits anteriorment esmentats.

- Condensadors ràpids.

Es disposa un a cada branca de transistors, com es pot veure a la *Figura 6.15*. Es tracta d'un circuit RC que redueix l'esforç elèctric sobre el semiconductor, per tal de garantir un règim de treball segur. El condensador absorbeix l'energia acumulada a la inductància paràsita del transistor durant cada període de commutació, proporcionant un camí alternatiu de descàrrega controlada i protegint els IGBTs davant les derivades de corrent, de tensió i pics de sobretensió que produeixen importants interferències electromagnètiques durant la commutació i poden destruir el dispositiu que commuta.

D'aquesta manera, la fiabilitat dels semiconductors en el disseny augmenta, reduint la degradació produïda per les pèrdues generades en forma de calor i l'augment de la temperatura de la unió.

Figura 6.15 Bloc drivers, mòdul d'IGBTs i snubbers del convertidor DC/AC

El dimensionament dels condensadors ràpids es pot veure a l'***Annex B***. Es dissenyen segons l'energia a emmagatzemar de la inductància paràsita del semiconductor, tenint en compte el cas més crític de treball a nivell de corrent. Com es veu a la *Figura 6.16* [16], amb aquest petit circuit RC s'intenta allunyar el transistor de les seva zona límit de treball. D'aquesta manera, durant la commutació, es vol que el pas d'un estat a l'altre (de saturació a bloqueig a la *Figura 6.16*) sigui el més directe possible, evitant que l'IGBT adquireixi valors de tensió V_{CE} superiors al límit.

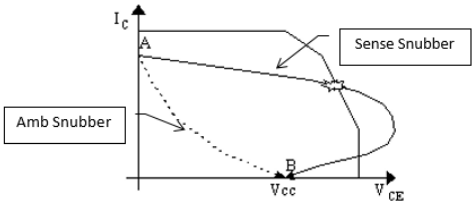


Figura 6.16 Comparativa amb i sense snubber de I-V en un transistor genèric

- Circuit de descàrrega.

Aquest circuit serveix de protecció als convertidors. És un element a incloure per la Normativa de Formula Student [1]. El disseny ha de poder aguantar el corrent màxim de descàrrega durant 15 segons i fer que la tensió del bus es trobi per sota de 40 V en menys de 5 segons al descarregar, sempre que es doni un error i salti l'estat d'Alarma o es pari voluntàriament el cotxe. Per tant, el seu objectiu, és com a mesura de seguretat, garantir que la tensió del bus de contínua es trobi per sota d'un valor límit establert, passat un temps definit (valors donats per l'organització de la Formula Student [1]), quan es produeix un error i es posa el sistema en estat d'Alarma amb la conseqüent obertura dels AIRs (explicats a l'apartat 8.3.3).

El circuit de descàrrega és del tipus RC, és a dir, format per una resistència i condensador equivalent. A més, disposa d'un relé, el qual es controla a través d'un senyal digital de 24 V enviat des de la placa principal del convertidor, explicada a l'apartat 6.1.1. Aquest relé és un model normalment tancat, que ha de ser capaç de descarregar el bus DC en cas de fallida de l'alimentació de control. Per aquest motiu,

el relé es dimensiona per aguantar la tensió de bateries d'una forma contínua. La resistència equivalent no tindrà grans sol·licitacions de potència, però sí de tensió, a l'haver de suportar el voltatge de bateries quan es descarreguen els condensadors del bus de contínua, amb la conseqüent dissipació de calor.

A través del programa dissenyat amb Matlab (***Annex B***), es poden realitzar els càlculs corresponents a la definició de la resistència equivalent necessària. A més, cal dimensionar el condensador del bus de contínua, tal i com s'explica a l'***Annex B***, on el valor resultant de capacitat s'utilitza per garantir el dimensionament del circuit de descàrrega i el compliment de la Normativa.

Definits els valors (exemple real definit a l'***Annex B***), es procedeix a la comprovació dels punts de la Normativa segons les equacions següents [4]:

$$V(t) = V_o e^{\frac{-t}{RC}} \quad \textbf{(6.20)}$$

$$I(t) = \frac{V_o}{R} e^{\frac{-t}{RC}} \quad \textbf{(6.21)}$$

Segons aquestes expressions, s'obtenen els gràfics de la *Figura 6.17* i *Figura 6.18* que mostren l'evolució de la descàrrega de la tensió de bateries i del corrent, a través del circuit definit de descàrrega:

Característica	Valor
Resistència	ARCOL HS100 470 Ω
Configuració de resistències	2 en sèrie
Resistència total	940 Ω
Capacitat total	1400 µF
Model de relé	PD5 Tyco Electronics
Tipus de contacte del relé	Normalment tancat
Límit corrent continu del relé	20 A
Rang de tensió del relé	2000 Vdc

Taula 6.4 Especificacions del circuit de descàrrega definit en el CAT 07e

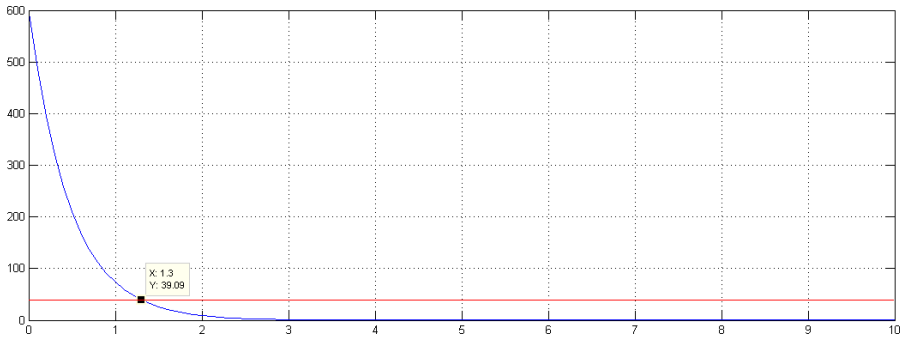


Figura 6.17 Gràfic de tensió respecte el temps del circuit de descàrrega

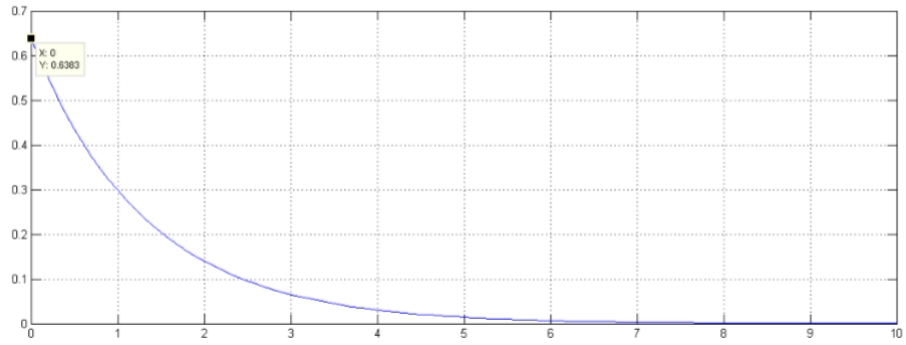


Figura 6.18 Gràfic de corrent respecte el temps del circuit de descàrrega

7. Funcionament del convertidor DC/AC. Control

En els dos apartats anteriors, s'ha analitzat i estudiat dues parts del tren de potència del vehicle elèctric CAT 07e, les quals per Normativa i funcionament del vehicle han d'anar unides. Per a posar en marxa el vehicle i que aquest respongui d'una manera correcta a les diferents proves, és necessari definir i ajustar el funcionament d'aquest convertidor, que inclou el control implementat pels motors i les sol·licitacions d'aquest (a nivell elèctric). Aquest control marcarà la resposta del vehicle durant les proves: respondre a la consigna de parell demandada pel pilot per posar en marxa el vehicle, la variació del parell exigit en un pas per corba o al frenar...

El convertidor DC/AC permet la transformació del corrent continu en el corrent altern que alimenta els motors síncrons emprats, variant la tensió, la freqüència o ambdues alhora. La realització d'aquesta transformació, la modula la commutació dels transistors de potència (en el cas concret estudiat IGBTs), i depèn, del control implementat per a la seva activació o bloqueig. Aquesta alternança entre els estats ON i OFF s'ha de fer de manera que només un dels dos semiconductors per branca estigui conduint, evitant un curtcircuit. Dels estats possibles del transistor, es dedueix que aquest senyal d'activació pot prendre dos valors: 1 si s'activa o 0 per desactivar-lo, habilitant doncs, el seu complementari. A aquest aspecte, s'afegeix una variable de temps mort, que evita la coincidència en el mateix estat dels dos IGBTs, reduint la possibilitat que apareguin problemes a nivell elèctric. Com es pot veure a la *Taula 7.1*, al disposar de 2 estats possibles i 3 branques per a completar un inversor trifàsic, es poden donar 8 estats de commutació [6]:

Branca fase A	Branca fase B	Branca fase C	Vector
0	0	0	V_0
1	0	0	V_1
1	1	0	V_2
0	1	0	V_3
0	1	1	V_4
0	0	1	V_5
1	0	1	V_6
1	1	1	V_7

Taula 7.1 . Estats de commutació de l'inversor

Aquests estats defineixen els senyals de control que permetran determinar les tensions trifàsiques de sortida del convertidor, corresponents al motor (V_a, V_b, V_c), el qual depèn dels diferents estats i de la tensió de la font utilitzada (en aquest cas, bateries).

El control utilitzat és, per tant, l'eina que marca i dirigeix el comportament dels convertidors i el funcionament dels motors. Aquest el podem separar en dues parts: la corresponent als estats des de que el cotxe està apagat fins que es troba en estat de posar-se en marxa (*Run*), la qual s'analitza a l'***Annex B*** (a la part de màquina d'estats) i la que comanda el funcionament, un cop es troba en aquest últim estat (*Run*).

Control. FOC i estimació de la posició

Els motors de corrent altern i, en concret, l'utilitzat per l'equip durant les tres temporades en les quals s'ha competit amb un vehicle elèctric (motor síncron d'imants permanents), es poden comandar amb tres tipus de control, principalment [16]:

- Regulació V/f

Es tracta d'un control escalar, fet que el fa més simple i fàcil, que no actua sobre les posicions dels vectors espacials en règim transitori, i això el fa poc precís. Es basa en la variació de la relació V/Hz de manera que el quocient es mantingui constant, per treballar en les zones de parell o potència constant (debilitament de camp). Presenta males prestacions a baixes velocitats amb pulsacions de parell, no controla el parell i té problemes de l'acoblament flux-parell, el qual pot fer inestable el sistema.

- DTC (control directe de parell, *Direct Torque Control*)

Es tracta d'un control vectorial que selecciona els vectors espacials de tensió generats per l'inversor, segons la diferència entre el valor de referència i el real de parell i flux de l'estator. Controla directament i per separat aquests dos últims paràmetres. Això suposa no requerir un modulador de PWM per controlar les intensitats, tensions i freqüència, eliminant etapes intermèdies i accelerant la resposta al parell requerit. Presenta una excel·lent resposta dinàmica, però en règim estacionari l'arrissat de parell és significatiu.

- FOC (control de camp orientat, *Field Oriented Control*)

Es tracta d'un control vectorial, com el DTC, que manipula les posicions espacials, requerint el coneixement de la posició angular del flux del rotor. Es basa en el control de la commutació del convertidor, per a controlar indirectament el parell i el flux. És el mecanisme de control utilitzat en el

conjunt del tren de potència del CAT 07e. S'utilitza el control de camp orientat amb l'estimació de la posició del rotor, a través dels senyals generats i enviats pel resolver (analitzat el funcionament a 6.1), els quals són emprats par a determinar l'angle amb el sistema SRF-PLL (*Synchronous Reference Frame Phase Locked Loop*).

Determinació de la posició. SRF-PLL

Es tracta d'un sistema de control implementat per a conèixer la posició i velocitat angular del motor, a través del seu rotor. L'esquema de funcionament del llaç de control es pot veure a la *Figura 7.1*. Es tracta del mètode més utilitzat i un dels més robusts per la detecció de l'angle (posició), en sistemes de tres fases que simplifiquen el sistema a una referència de components directa i quadratura.

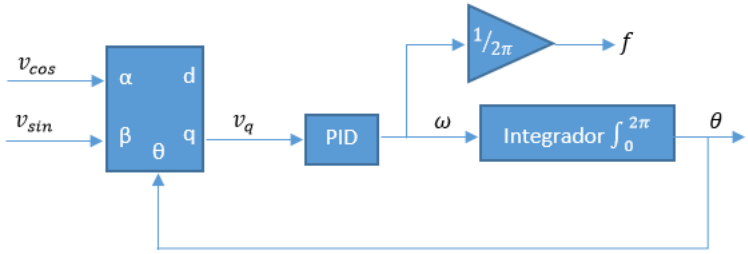


Figura 7.1 Esquema del control SRF-PLL

Les entrades del sistema per determinar la posició són dos senyals v_{sin} i v_{cos}, els quals un cop filtrats i modulats, s'utilitzen com dos ones sinusoïdals desfasades 90º (com els senyals ortogonals obtinguts a partir de la transformada de Clarke, v_α i v_β).

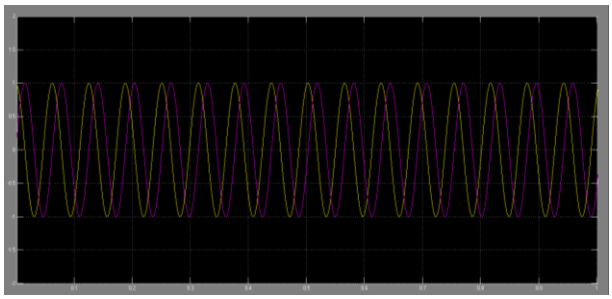


Figura 7.2 Senyals ortogonals provinents del resolver

Mitjançant la transformada de Park, s'aplica una rotació per passar a referència síncrona DQ, obtenint els senyals v_d i v_q. Aquesta transformació requereix de la posició angular del rotor, en una primera estimació, per a realitzar el canvi de referència:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad \textbf{(7.1)}$$

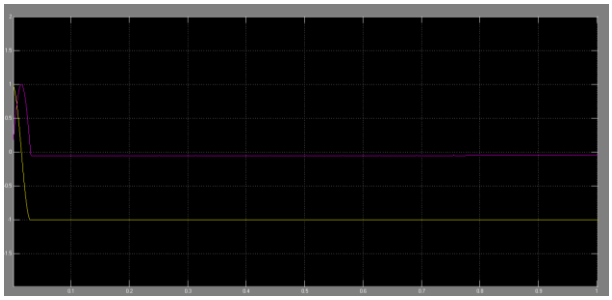


Figura 7.3 Senyals v_d (groc) i v_q(lila)

La component utilitzada de les dues sortides de la transformada de Park, marca la diferència entre la fase calculada i real, en aquest cas $\mathrm{v_q}$. L'objectiu és minimitzar l'error, com s'aprecia a la *Figura 7.3*, on el senyal de l'eix de quadratura té un error significatiu en un inici i en un interval de temps petit disposa d'un valor proper a zero, el que implica que la diferència entre la posició real i l'estimada és mínima.

Mitjançant l'ajust del controlador PID, el qual té la funció de filtre, s'obté la velocitat angular (rad/s) i per tant, la freqüència de treball en Hertz. Aquest controlador ajustarà el valor de sortida per obtenir, una resposta dinàmica adequada, i així, una lectura de posició més precisa.

$$\mathrm{PID(s)} = \mathrm{K_P} + \frac{\mathrm{K_I}}{\mathrm{s}} + \mathrm{K_D s} \qquad \textbf{(7.2)}$$

Ajustat el controlador de manera pràctica (prova i error), s'obté a la sortida la velocitat angular. Amb la integració d'aquesta es determina la posició corresponent al flux del rotor, necessari en el control de camp orientat (FOC), per a realitzar els canvis de referència que permeten simplificar el sistema.

Es limita i satura el càlcul de l'integrador entre 0 i 2π per a tenir una referència directa en graus (360º).

$$\theta(\mathrm{t}) = \int \omega(\mathrm{t}) \qquad \textbf{(7.3)}$$

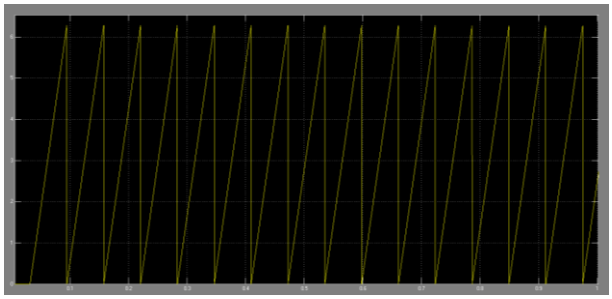


Figura 7.4 Càlcul de la posició del rotor amb el sistema SRF-PLL al CAT 07e

La resposta obtinguda d'aquest sistema es pot apreciar a la *Figura 7.4* on, el senyal triangular adquirit, mostra l'evolució de la posició del rotor des de 0º fins als 360º (6,28 rad aproximadament), saturant en aquest punt i tornant a la posició inicial (zero). D'aquesta manera s'obté una lectura de la posició més precisa que la dissenyada al CAT 06e, basada en el càlcul de la arctangent dels senyals de sinus i cosinus provinents del resolver. En aquest últim cas, com es pot veure a la *Figura 7.5* (s'ha simulat un exemple genèric amb els senyals necessaris per veure la resposta), al definir un recorregut entès com els 360º d'una volta sencera, el senyal no es situava directament a l'inici, generant un error en cada volta que afecta a l'estimació de la posició real i conseqüentment, als càlculs realitzats pel control implementat.

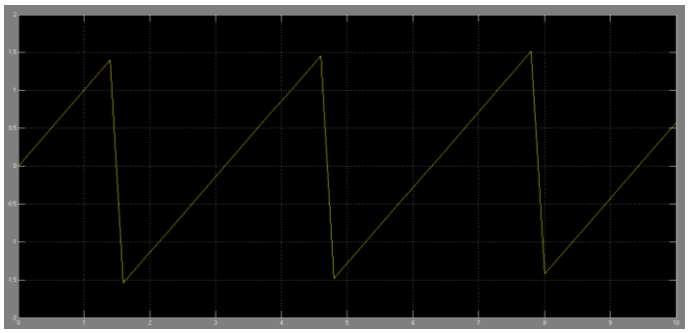


Figura 7.5 Càlcul generalitzat de la posició del rotor al CAT 06e

Finalment, com es pot veure a la *Figura 7.6*, es realitza una simulació amb el programa Simulink d'una acceleració real i viable en el vehicle, que garanteixi la contínua i precisa estimació de la posició, malgrat un canvi de velocitat i, per tant, de freqüència en el sistema. Amb l'augment de la velocitat, també augmenta la freqüència, el que implica una disminució del període, com es pot veure a la *Figura 7.6*, on a cada instant es va fent més estret. A més, aquesta prova es realitza a la bancada de proves real, un cop implementat el sistema de control, per veure que els resultats teòrics i obtinguts en simulació es mantenien en el cas real (*Figura 7.7* [2]).

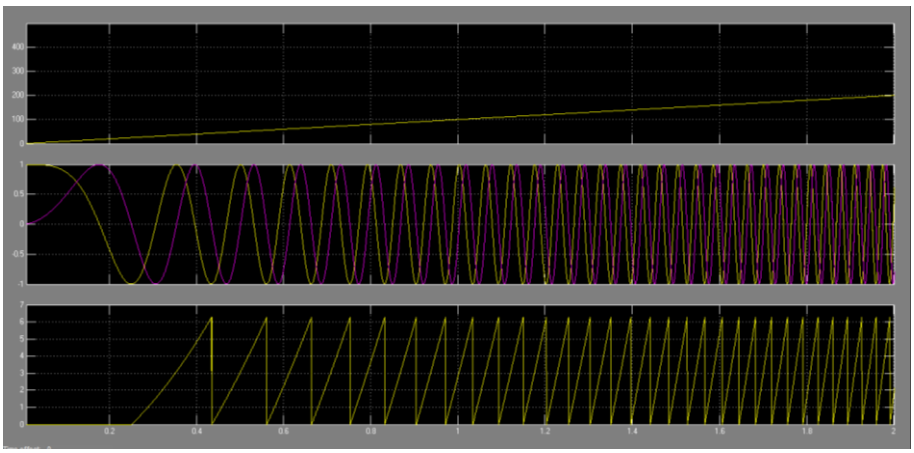


Figura 7.6 Resposta de velocitat (1er), senyals v_{sin} i v_{cos} (2^{on}) i posició (3er), davant una acceleració

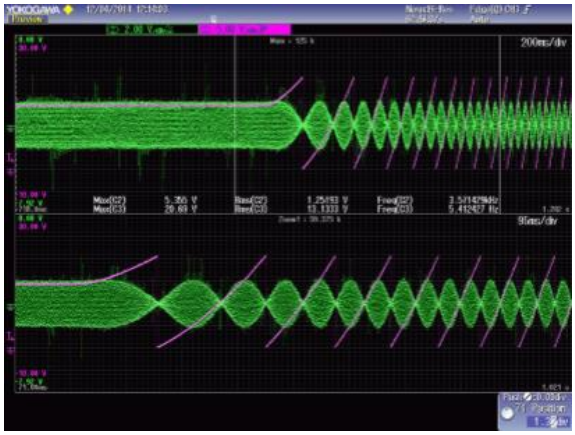


Figura 7.7 Resposta dinàmica del càlcul de posició a una acceleració

FOC. Control de camp orientat

El control de camp orientat és un sistema, com s'ha esmentat anteriorment, basat en el càlcul de la posició del rotor per a controlar paràmetres com el parell i el flux, a través de la configuració dels temps de commutació dels transistors de potència dels convertidors DC/AC.

Permet aconseguir un control eficient amb un elevat dinamisme durant el règim transitori. Té la capacitat completa de proporcionar parell a baixes velocitats. Dóna la opció de desacoblar el control de parell i flux per realitzar-ho independentment l'un de l'altre.

A continuació, es mostra l'esquema del sistema de control de camp orient (FOC) implementat [2][9]:

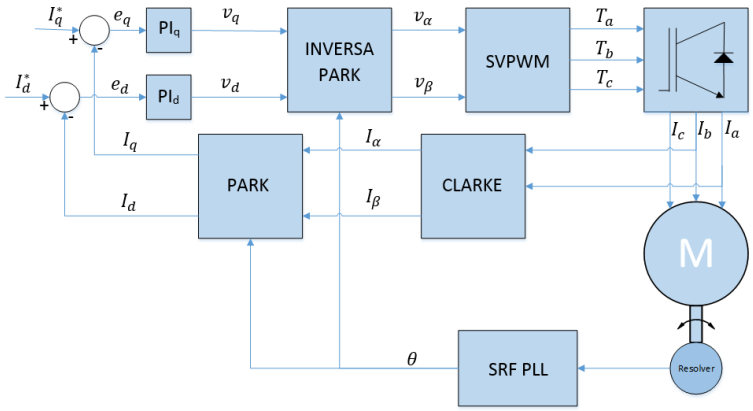


Figura 7.8 Esquema del sistema de control FOC

Mitjançant les sondes de corrent situades a dues fases de cada convertidor i amb l'equació 6.4, es controlen els corrents de l'estator dels dos motors. És important que les sondes proporcionin ones de corrent precises per aconseguir que el càlcul del control sigui òptim (a la *Figura 7.9* es pot veure una comparativa entre l'ona de corrent del convertidor utilitzat al CAT 07e i la d'un convertidor comercial INFRANOR).

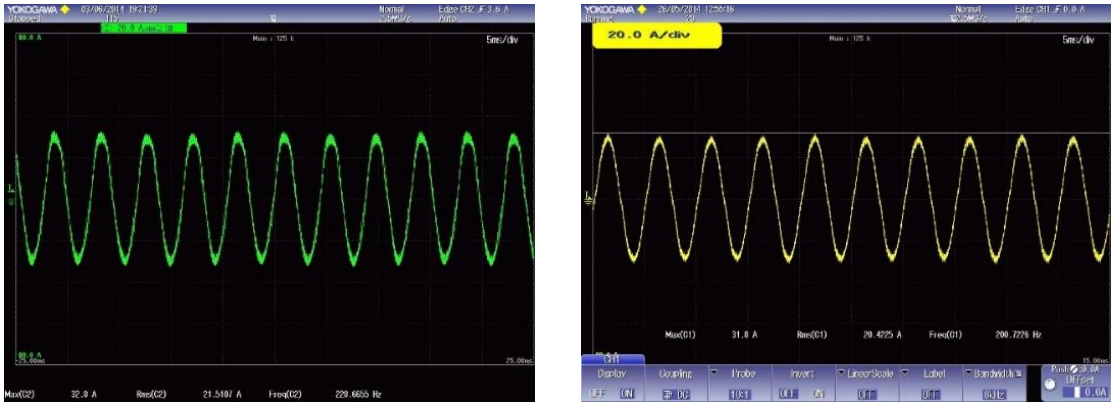


Figura 7.9 Ones de les sondes de corrent. Convertidor CAT 07e (verd) i comercial INFRANOR (groc)

Mitjançant aquestes lectures d'intensitat es realitza un canvi de variables, amb la transformació de Clarke, a un sistema bifàsic ortogonal.

$$I_\alpha = I_a \tag{7.4}$$

$$I_\beta = \frac{I_a + 2I_b}{\sqrt{3}} \tag{7.5}$$

Realitzada la transformació, es tenen 2 senyals d'alterna desfasats 90º.

Per fer més simples i intuïtius els càlculs del control, es fa un canvi de variables a una referència síncrona amb el flux del rotor, mitjançant la transformació de Park, que empra la lectura de posició del rotor estimada amb el sistema SRF-PLL, explicat a l'apartat 0.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \tag{7.6}$$

Amb aquesta transformació, s'obtenen dos senyals de contínua per una sol·licitació de parell constant. Aquests dos corrents (I_d i I_q) no poden ser controlats inicialment, de manera independent, degut a l'acoblament creuat entre els circuits corresponents a les equacions que modelitzen el motor per a controlar-lo, com es veu a l'***Annex C***. Quan es controla el corrent directe, variant la tensió v_d, implica una modificació en la tensió v_q i per tant, un canvi en el corrent de quadratura no desitjat. Això es pot

solucionar amb el desacoblament de les equacions, l'anàlisi del qual, queda fora de l'abast d'aquest projecte.

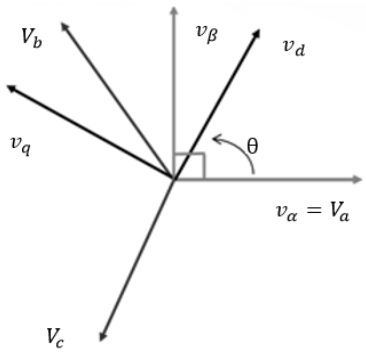


Figura 7.10 Eixos de referència per transformada (superior)

Amb aquests corrents, s'ajusta el corrent directe al flux del rotor (ψ_r), aconseguint que:

$$\psi_d = \psi_r \rightarrow \psi_q = 0 \quad \textbf{(7.7)}$$

Això implica que l'eix de quadratura controli el parell, sense la influència de l'eix directe. Definits els nous corrents, s'estableix una limitació respecte aquests:

$$I_{igbt}^{max} \geq \sqrt{I_q^2 + I_d^2} \quad \textbf{(7.8)}$$

La suma vectorial d'ambdós ha de ser menor al corrent màxim que puguin suportar els IGBTs, els quals han estat definits pels valors màxims que es podrien donar, en base a les sol·licitacions de parell necessàries. Si es superés el límit imposat per aquesta consideració, els transistors de potència podrien fer-se malbé, per això es disposen de les alarmes de protecció explicades a l'apartat 6.2.3.

Ja que el corrent de quadratura és el que controla el parell, interessa que de l'equació 7.8 es dediqui la major magnitud possible a I_q, el que implica imposar, que el corrent directe sigui el més pròxim a zero possible.

D'aquesta manera es defineix l'error entre la consigna desitjada (I_q^*) i la consigna *feedback* o realimentada (I_q), provinent dels càlculs realitzats amb les lectures de les sondes. L'objectiu és aconseguir que l'error e_q i e_d sigui el mínim possible. D'aquesta manera, s'estaran obtenint els valors desitjats, segons la sol·licitació de parell realitzada pel pilot a través del pedal.

Un cop es calcula l'error, es disposa de dos controladors PI que permetran obtenir les tensions v_q i v_d. Aquests dos controladors es defineixen en base a simulacions i proves reals realitzades sobre bancada, per obtenir una resposta estable i ràpida a la consigna de parell realitzada, com es pot veure a la *Figura 7.11* [2]. S'observa l'evolució en la resposta del corrent de quadratura, ajustant el valor de la constant d'integració, per fer més ràpida la resposta a un graó de parell i el valor de la constant proporcional, per reduir el sobrepuig generat per l'integrador.

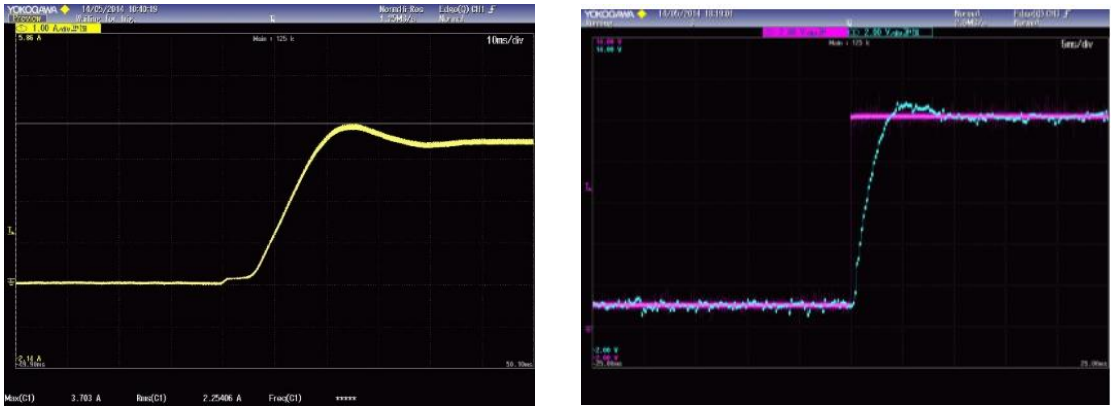


Figura 7.11 Evolució de la resposta d'Iq a un graó de parell inicial (esquerra) i final (dreta)

Obtingudes aquestes tensions, cal tenir en compte una consideració: el límit de tensió capaç de sintetitzar el convertidor, el qual depèn de la tècnica de modulació PWM emprada. En el control s'ha utilitzat la modulació SVPWM degut al seu aprofitament de la tensió de bateries (V_{bus}) i al baix contingut harmònic que té, fet que minimitza la distorsió produïda. El límit a complir serà:

$$\mathrm{V_s^{max}} = \frac{\sqrt{2}}{2}\mathrm{V_{dc}} \geq \sqrt{\mathrm{v_d^2} + \mathrm{v_q^2}} \qquad \textbf{(7.9)}$$

On V_s^{max} correspon a la tensió màxima sintetitzable.

Definit aquest límit, en el programa s'implementa una saturació que assegura que no es sobrepassi aquest valor ja que, en cas que el control ho demanés, el convertidor no podria sintetitzar més a la sortida i treballaria en sobremodulació, donant lloc a un alt contingut d'harmònics que distorsionarien el senyal i provocarien problemes de funcionament del control. Aquesta consideració té una influència a nivell de control i de limitació de potència del conjunt, donada la relació directa entre tensió i velocitat, al limitar un paràmetre, indirectament s'està limitant l'altre.

Com es pot veure a l'equació 7.10, la velocitat té una relació directa amb el flux. Aquest es pot disminuir mitjançant tècniques basades en el debilitament de camp, que permetrien assolir velocitats més elevades, malgrat les limitacions imposades per la tensió. Aquesta zona es caracteritza per treballar en punts de potència constant. Treballar en aquesta zona per una tensió concreta, implica haver d'actuar

sobre el flux per treballar a velocitats majors, i per tant, utilitzar la component de corrent directe, perdent magnitud de corrent de quadratura per a realitzar parell.

$$\omega_r^{max} \leq \frac{v_q^{max}}{4K_\psi} \quad \textbf{(7.10)}$$

Aquestes tècniques no s'estudien donat que el prototipus utilitzat no requereix del treball en aquestes condicions per les sol·licitacions i necessitats que es presenten en les proves.

Mitjançant les tensions directa i quadratura obtingudes a la sortida dels controladors PI i la posició del rotor, es realitza la transformació Inversa de Park, per obtenir les entrades ortogonals d'alterna necessàries per a la modulació amb l'SVPWM, que determina els temps de commutació de les tres branques de cada convertidor DC/AC.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad \textbf{(7.11)}$$

v_α i v_β són les tensions utilitzades en el càlcul de l'SVPWM que permeten determinar el sector de l'hexàgon en el que es troba el vector resultant en cada instant, i mitjançant aquest, determinar els temps corresponents a les tres branques: Ta, Tb i Tc.

El desenvolupament i estudi dels càlculs realitzats a l'SVPWM per a determinar aquests paràmetres, es poden veure a l'***Annex D***. Determinats els temps de branca Ta, Tb i Tc, cal tenir en compte que cada una, disposa de dos transistors de potència, i aquests s'obriran de manera complementària (quan un estigui obert, l'altre estarà tancat), amb un interval de temps entre la commutació dels dos (temps mort), per evitar problemes en el circuit. Aquests períodes marcaran la commutació dels IGBTs i modularan els senyals, per tal de proporcionar el parell requerit en cada instant.

A l'***Annex E***, es presenten unes imatges corresponents a unes simulacions realitzades amb el programa Simulink, per tal d'obtenir un sistema aproximat al del tren de potència (bateries, convertidor i motor) amb el control utilitzat en el sistema real. Com s'aprecia a les figures, la resposta no és tan clara com a la realitat, però el model ha servit per a aclarir conceptes relacionats al conjunt.

8. Bateries

Les bateries són la font d'alimentació del tren de potència del vehicle elèctric CAT 07e. Són cel·les electroquímiques que converteixen l'energia química interna en elèctrica, que posteriorment, serà transformada en mecànica al motor per moure el cotxe. Són elements, que mitjançant un dispositiu, es poden carregar, moment en el qual, la transformació energètica és a la inversa, passant d'elèctrica a química.

Internament, la bateria es pot esquematitzar com s'observa a la *Figura 8.1* [16]. El seu rendiment depèn de diferents variables, com la temperatura o el voltatge. Un model real ha d'incloure un potencial d'equilibri E, el qual depèn de la temperatura i de la quantitat de material actiu disponible als elèctrodes, una resistència interna (modelat com a R_1 i R_2) que defineix les pèrdues per efecte Joule que hi ha a la bateria i un condensador que caracteritza la resposta transitòria, ja que la caiguda de tensió produïda a l'aplicar una càrrega no és instantània.

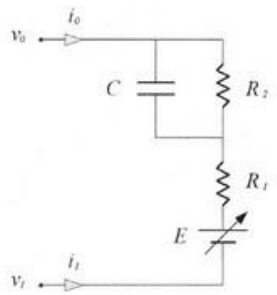


Figura 8.1 Esquema elèctric intern d'una bateria genèrica

L'equació general que marca el comportament elèctric de la bateria és:

$$V_{bateria} = E + R_{interna} \cdot I \quad \textbf{(8.1)}$$

A part de l'esquema elèctric, la estructura interna està composada de 4 elements principals:

- Elèctrode positiu: és un òxid que és capaç de ser reduït durant el procés de descàrrega. Consumeix electrons del circuit.

- Elèctrode negatiu: és un metall que és capaç de ser oxidat durant el procés de descàrrega. Genera electrons en el circuit.

- Electrolític: és el medi que permet la conducció entre els dos elèctrodes. Ha de tenir bona conductivitat pels ions que formen part de les reaccions entre elèctrodes. Pot ser líquid o material sòlid.

- Separador: és la capa de material aïllant elèctric que separa físicament els elèctrodes de polaritat oposada. Ha de ser permeable als ions i ha d'immobilitzar l'electrolític. Fet de polímer sintètic.

Les bateries tenen diferents paràmetres i característiques que les defineixen segons tipus i material. Cadascuna tindrà uns avantatges i inconvenients que cal analitzar, per determinar la tipologia més adient per a un vehicle elèctric de competició, com a font d'energia.

8.1. Tipologia. Selecció

Diferents aspectes influeixen en la selecció d'un tipus de bateria o altre. L'energia específica, potència específica, vida útil (número de cicles de descàrrega), un rang alt de càrrega o el pes i dimensions de les cel·les, són alguns dels paràmetres a tenir en compte al comparar i decidir-se per un tipus concret.

Donades les condicions d'operació i els requeriments del cotxe per a realitzar les diferents proves dinàmiques que formen la competició (Endurance, Autocross, Skidpad i Acceleració), la tecnologia de cel·la emprada ha de complir uns objectius:

- La configuració del conjunt de bateries ha de proporcionar la suficient energia per a completar la prova principal i més llarga de la competició (Endurance), amb la màxima potència que pugui desenvolupar el cotxe en termes de parell i velocitat, segons el circuit.
- Per millorar les prestacions dinàmiques del conjunt, es busca reduir al màxim el pes total, per això es cerca un tipus que proporcioni les necessitats elèctriques, minimitzant el volum i pes del Package de bateries.
- Màxim rendiment. Això implica una bona conversió energètica interna i a més, unes pèrdues per efecte Joule, el més petites possibles. Això ajuda a evitar temperatures tan elevades en el contorn i interior de les cel·les, fet que influeix en la seva eficiència.
- Fiabilitat. Comptar amb unes cel·les que disposin d'una vida d'operació llarga i de qualitat, des del punt de vista funcional, permetrà realitzar més cicles de càrrega i descàrrega, així com allargar el seu ús per temporades posteriors amb bons resultats.

A continuació, la *Taula 8.1* mostra un conjunt de tipus, amb avantatges i inconvenients [8][9]. És el primer pas de selecció de la tecnologia emprada, com a bateria del tren de potència.

Tipus bateria	Avantatges	Inconvenients
Plom àcid	Baix cost i fàcil fabricació	Pes, baixa densitat d'energia i no admeten descàrregues profundes
Níquel ferro	Fabricació, cost, vida útil i possibilitat de sobrecàrrega	Baixa eficiència
Níquel Cadmi	Alt rang de temperatures de funcionament i sobrecàrrega	Baixa densitat d'energia i elevat efecte memòria
Níquel hidrur metàl·lic	Baix efecte memòria	Problemes amb la temperatura i la potència eficaç
Ió Liti	Alta densitat d'energia, baix efecte memòria (vida útil alta)	Sensibles al canvis de temperatura i no admeten descàrrega completa
Polímer Liti	Gran densitat de càrrega, reduït tamany i bona capacitat de descàrrega	Inutilitzables si es descarreguen per sota del valor de tensió mínima

Taula 8.1 Comparativa d'avantatges i inconvenients dels tipus de bateries

A més, a la *Taula 8.2* [6][9] es presenten alguns valors característics relacionats als paràmetres, abans esmentats, que s'han de tenir en compte per a les necessitats de l'equip i el cotxe.

Tipus bateria	Energia específica (Wh/kg)	Potència específica (W/kg)	Eficiència energètica (%)	Cicles de vida	Cost estimat (US$/kWh)
Plom àcid	35-50	150-400	80	500-1000	100-150
Níquel ferro	50-60	80-150	75	1500	200-400
Níquel Cadmi	50-60	100-150	75	800	250-350
NiMH	60-80	200-300	70	750-1200	200-350
Ió Liti	80-130	200-300	>95	>1000	200
Polímer Liti	150-200	350	>90	>1000	150

Taula 8.2 Comparativa de diferents paràmetres dels tipus de bateries

A partir d'aquests valors es decideix seleccionar les bateries de tipus Polímer Liti. Tenint en compte les opcions de mercat, el pressupost i la relació qualitat-preu, es decideix utilitzar unes cel·les de Melasta, les quals destaquen per una gran qualitat i ser el proveïdor de diversos equips de la competició. Amb les seves cel·les s'aconsegueixen els objectius de baix pes, correctes dimensions, fiabilitat i elevada densitat d'energia.

Finalment, escollida la tecnologia a emprar i el fabricant, cal estudiar els diferents models per a realitzar la tria més convenient a les necessitats del vehicle per les proves. Els models que l'equip analitza es poden veure a l'***Annex H***.

El model seleccionat és de Melasta el SLPBA843126. L'elecció es justifica per disposar d'una gran capacitat (mAh), una magnitud energètica (Wh) elevada entre les possibilitats, dimensions i pes inferior a altres i una gran densitat energètica. El defecte, és el màxim corrent de descàrrega, un dels models més limitats, però suficient per als nivells de parell i intensitat de treball del cotxe (màxim 160 A).

A continuació, es presenten a la *Taula 8.3* les especificacions més importants del model SLPBA843126:

Característica	**Valor**
Tensió nominal	3,7 V
Tensió mínima	3 V
Tensió màxima	4,2 V
Capacitat	6,35 A
Capacitat màxima de descàrrega	15C
Màx. corrent continu de descàrrega	95,25 A
Corrent màxim de descàrrega	127 A
Impedància interna	2 mΩ
Rang de temperatures de treball	-20 a 60 ℃
Cicles de vida	≥ 100 cicles
Amplada	42,7 mm
Alçada	127,5 mm
Gruix	10,5 mm
Pes	131 g

Taula 8.3 Especificacions del model de bateria Melasta SLPBA843126 del CAT 07e

8.2. Dimensionament i configuració

Escollit el model de bateria a utilitzar al cotxe, segons les seves prestacions i paràmetres, cal realitzar un dimensionament i configuració de les cel·les que permeti obtenir les magnituds elèctriques necessàries de tensió, corrent o potència, a més d'estudiar i dissenyar un empaquetat segons el seu pes, volum i disposició en el cotxe, des del punt de vista aerodinàmic i mecànic.

Els aspectes a tenir en compte segons les necessitats de les competicions i del propi vehicle són:

- L'energia necessària per a realitzar la prova principal i de més duració de les competicions (Endurance). És una prova que pel tipus de circuit habitual, no permet anar a màxima velocitat o requerir de parells massa elevats. El punt crític radica en la durada de la prova, amb una distància de 22 km recorreguda en un número X de voltes, al voltant d'un circuit definit per l'organització. La capacitat, la tensió i configuració de les cel·les definiran aquest paràmetre.
- La tensió total d'alimentació. Aquest paràmetre dependrà de les necessitats dels motors utilitzats per al seu correcte funcionament i per a treure el seu potencial.
- El corrent necessari. Aquest factor dependrà del parell que puguin arribar a donar els motors ja que són dos paràmetres directament relacionats. La capacitat de descàrrega màxima de la bateria afectarà en la configuració final, tant des del punt de vista del corrent màxim requerit com del temps que triguin les cel·les en arribar al seu valor mínim.

Aquests són els aspectes principals des del punt de vista elèctric a tenir en compte. Altres factors com les temperatures de treball que es puguin donar, per dimensionar la refrigeració (s'analitza a l'apartat 8.3.2) o la compactació i subjecció de les cel·les per les forces que hagin de resistir en el moviment del cotxe o les vibracions (estudi fora de l'abast del projecte), s'han de tenir en compte.

A continuació, s'introdueixen alguns càlculs a tenir en compte per a la configuració de les bateries, per tal de garantir les prestacions necessàries. Els valors presentats corresponen a les especificacions anteriorment descrites dels convertidors i motors, així com a les limitacions presentades per la organització de la Formula Student (per exemple, tensió màxima admissible 600 V) [1].

$$\mathrm{V_{dc}} = 600\ \mathrm{V}, \mathrm{I_{màx}} = 150\ \mathrm{A}$$

Disposant aquests valors s'obté una potència elèctrica màxima:

$$\mathrm{P_{bateries,màx}} = 600 \cdot 150 = 90\ \mathrm{kW} \quad \textbf{(8.2)}$$

És un valor que supera el marcat per Normativa, com a màxima potència subministrable per les bateries (85 kW). A partir del model de bateries seleccionat, es determina una configuració que proporcioni els valors necessaris, tenint en compte les seves especificacions.

Per això, l'equip realitza unes simulacions representades en els gràfics següents [4], per tal de conèixer els valors d'energia requerits per a acabar un Endurance. Aquests gràfics es realitzen a través de la simulació d'un model que imposa les velocitats obtingudes, a través del programa Optimum Lap que permet visualitzar circuits FSAE. Són una aproximació al cas real, que permeten fer-se una idea dels valors que poden ser requerits per a les proves.

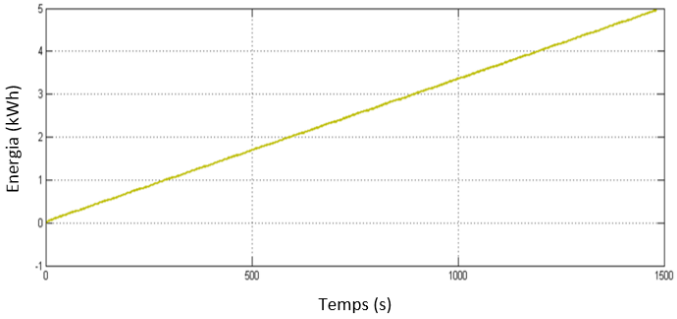


Figura 8.2 Gràfic de l'energia consumida en funció del temps

Amb la *Figura 8.2*, es pot veure que en base als paràmetres extrets d'un traçat de l'organització FSAE, en un temps de 1500 segons (25 minuts) serien necessaris uns 5 kWh. Aquest és el temps aproximat de realització de la prova en les diferents competicions.

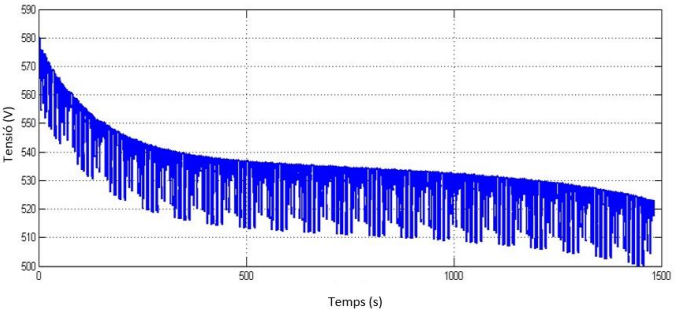


Figura 8.3 Gràfic de la disminució de la tensió total en funció del temps

En la *Figura 8.3*, s'analitza com aniria disminuint la tensió de bateries per al cas genèric fet, veient que als 25 minuts, el rang de tensió es trobaria entre 500 i 510 V. Aquest valor es tindrà en compte donat el valor de voltatge mínim de les cel·les seleccionades.

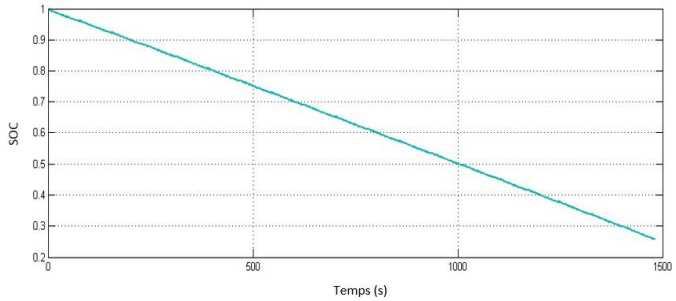


Figura 8.4 Gràfic de l'estat de càrrega respecte el temps

Un altre aspecte a tenir en compte, és l'estat de càrrega de les bateries completada la duració de la prova. S'observa com el conjunt es quedaria amb poc més del 20% total.

Aquestes simulacions es realitzen amb una configuració definida: 2 blocs paral·lels de 140 cel·les en sèrie cada un, fent un total de 280 cel·les. Per tant, la determinació de la configuració de bateries més adient, es realitza a través d'un procés iteratiu que ajustarà el sistema als requeriments d'energia, tensió i corrent necessaris.

Amb aquesta configuració, a continuació s'analitzen els aspectes necessaris, per tal de garantir les sol·licitacions requerides des del punt de vista elèctric.

A nivell de tensió, el valor màxim és de:

$$V_{màx,bateries} = 4{,}2 \cdot 140 = 588\ V < 600\ V \quad \textbf{(8.3)}$$

Es compleix el voltatge màxim Vdc admès per Normativa, fixat en 600 V.

La capacitat de la que es disposa és:

$$C_{bateries} = 6{,}35 \cdot 2 = 12{,}7\ Ah \quad \textbf{(8.4)}$$

El valor ve determinat per la capacitat nominal de les cel·les i per la disposició en 2 blocs paral·lels. Tenint en compte la velocitat de descàrrega del model escollit (15 C), es pot determinar el corrent màxim que podrien subministrar les bateries:

$$I_{màx,bateries} = C_{bateries} \cdot 15C = 12{,}7 \cdot 15C = 190{,}5\ A \quad \textbf{(8.5)}$$

Tenint en compte l'equació de Peukert, que representa d'una manera aproximada el comportament en la descàrrega d'una bateria, podent conèixer el temps de duració d'aquesta (fins arribar a V_{min}) segons un corrent demanat, es determina:

$$t = \frac{C_{bateries}}{I^k} = \frac{12,7}{190,5^{1,2}} = 1,4 \text{ min} \quad \textbf{(8.6)}$$

Les bateries arribarien al valor de tensió mínima en 1,4 minuts, per una sol·licitació de corrent fix de 190,5 A i una constant de Peukert de 1,2 (factor depenent del tipus de bateria).

A nivell energètic, de la configuració establerta es pot deduir que:

$$E_{bateries} = V_{nom.,bateries} \cdot C_{bateries} = 3,7 \cdot 140 \cdot 12,7 = 6,6 \text{ kWh} \quad \textbf{(8.7)}$$

Analitzant el valor obtingut amb l'extret de la simulació, s'observa la disposició d'un marge de seguretat de 1,3 (30% aproximadament), considerant la tensió nominal de bateries. D'aquesta manera, a nivell d'energia necessària, es pot considerar que el sistema està sobredimensionat, però cal tenir en compte les condicions òptimes de la simulació vers les condicions reals de conducció del pilot.

A nivell de potència, tenint en compte el límit de 85 kW establerts per Normativa:

$$P_{màx,bateries} = V_{màx,bateries} \cdot I_{màx,bateries} = 4,2 \cdot 140 \cdot 190,5 = 112 \text{ kW} \quad \textbf{(8.8)}$$

Aquesta seria la potència màxima que es podria extreure de bateries en un cas ideal. Tenint en compte que el corrent es limita a 160 A, a través dels convertidors, es té:

$$P_{bateries} = 4,2 \cdot 140 \cdot 160 = 94,08 \text{ kW} > 85 \text{ kW} \quad \textbf{(8.9)}$$

Al superar aquest límit de potència amb la configuració definida, es limita el valor de potència, a través de la centraleta principal del cotxe. Mitjançant una sonda de corrent, la unitat principal de control rep la lectura de corrent de bateries, i a través del sistema de control de les bateries, rep la tensió total en cada instant. A partir d'aquests valors es defineix una saturació de la potència elèctrica límit, fixada per la organització. Cal tenir en compte, però, que l'equació 8.9 és un cas ideal i que difícilment, es poden donar les condicions de tensió i corrent en les proves esmentades.

Com s'ha comentat anteriorment, l'equació de Peukert proporciona una estimació del temps que trigarà en descarregar-se la bateria, segons la seva capacitat i l'aplicació d'un corrent constant. Durant la prova de l'*Endurance* es produeix una variació contínua de la intensitat, ja que el pilot va accelerant o frenant, segons la zona del circuit en la que es trobi. Al variar la pressió exercida al pedal d'accelerar, varia el parell sol·licitat i el corrent extret de bateries. Malgrat això, s'utilitza l'expressió per deduir quin seria el parell mig que es demanaria a les bateries per a completar un *Endurance* (25 minuts aproximadament):

$$t = \frac{C_{bateries}}{I^k} \rightarrow I = \sqrt[1,2]{\frac{12,7}{0,4167}} = 17,25\ A \quad \textbf{(8.10)}$$

El valor de corrent obtingut seria la intensitat mitjana que es demanaria durant els 25 minuts que dura aproximadament la prova. Es realitza aquest càlcul per obtenir un valor orientatiu, ja que l'equació no és apte per treure aquest tipus de conclusions, al basar-se en el treball a un corrent constant, fet que no es produeix en una prova d'automoció, on s'accelera, es deixa anar el cotxe per inèrcia o es frena.

Finalment, concloure que en el disseny de les bateries es realitza el procés de selecció sota un estudi dels models emprats per altres equips i de les marques fabricants de cel·les aptes per a les necessitats i prestacions requerides. Al tractar-se d'un equip de competició que també treballa com una empresa, cal tenir en compte la relació qualitat-preu, pel pressupost del que es disposa. Definit el model utilitzat, s'ha pogut veure que les expressions analítiques permeten realitzar una estimació de les prestacions proporcionades per les bateries, segons diferents configuracions, però que la forma més real i precisa de determinar un dimensionament, és mitjançant un model del conjunt tren de potència que permeti realitzar un procediment de prova i error, on anar ajustant la configuració, fins aconseguir cobrir les necessitats desitjades.

8.3. Integració en el vehicle

8.3.1. Localització i Package

La localització del Package que formen les bateries és un dels punts més crítics en la integració global del vehicle. No només pel volum que ocupen o per la seva funció, si no pels elements addicionals de control i protecció que incorporen i que cal tenir en compte. Aquests són: l'IMD, el BMS, fusibles, relés, plaques de control de les cel·les, cablejat... Aquests es descriuen a l'apartat 8.3.3 i són elements que van introduïts a les caixes que contenen les bateries o a l'estar associats a elles, es situen a prop.

A la *Figura 5.10*, es pot veure la localització de les bateries en el cotxe. Una opció de disposició és a la part de darrere del monocasc, reduint l'amplada del vehicle per temes aerodinàmics, i simplicitat de les connexions elèctriques. Finalment, s'opta per disposar-les als laterals del monocasc per:

- Repartiment de pes. D'aquesta manera s'evita que tot el que pes que suposa el tren de potència (inversors, motors i bateries) estigui en la part de darrere, facilitant l'equilibri del conjunt. Aquest també va ser el motiu d'establir part de les bateries a cada lateral del vehicle.

- Restriccions i limitacions d'espai. Esmentat en els apartats 5.3.1 i 6.2.1, l'ús dels motors i convertidors del CAT 06e, dificulta la modificació de la localització, al estar ajustats per aquella disposició. A més, la integració de les unitats de control electrònic i l'estructura del xassís, fa difícil per mesures, ajustar la caixa de bateries a la part de darrere.
- Facilitat en la manipulació dels components interns de les caixes. La disposició lateral d'aquestes, permet obrir i manipular fàcilment qualsevol tipus d'element, així com el control i visualització de les diferents parts davant de qualsevol problema.

Descrita la localització en el cotxe, es defineix la distribució de les cel·les a les caixes de fibra de carboni. Per protegir-les i mantenir-les fixes, s'insereixen en capses de polietilè. Les dimensions de les capses és l'idoni per a quedar fixes, amb un mínim de joc que permeti treure-les per a qualsevol comprovació o canvi. Les connexions fetes entre cel·les, busquen la simplicitat i lleugeresa. Es basa en làmines d'alumini que connecten el terminal d'una cel·la amb el terminal contrari de l'altre, per a realitzar una connexió sèrie, col·locades sobre un suport de plàstic que disposa de dos forats per on passar els taps de cada cel·la (terminals positiu i negatiu) i realitzar les connexions, com es veu a la *Figura 8.5*.

Figura 8.5 Detall de les connexions entre cel·les

Com s'ha comentat, les cel·les es fiquen en capses (stacks), les quals tenen forats per a les subjeccions de les plaques de control. Aquestes petites PCBs (*Figura 8.6*) permeten el control de les cel·les que formen el Package de bateries del CAT 07e, coneixent la temperatura i tensió de cada una amb el BMS.

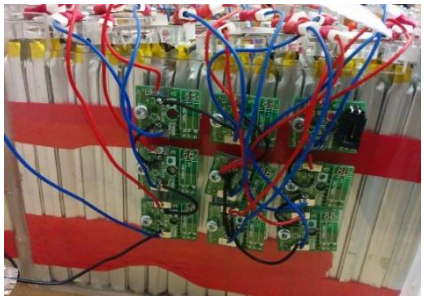


Figura 8.6 Plaques de control de les cel·les i terminals de connexió cel·la-PCB

Finalment empaquetades, es disposen a l'interior de les caixes de fibra de carboni, material que permet alleugerir el conjunt Bateries. Cada caixa disposa de 8 capses de polietilè amb les cel·les connectades entre si, per complir la configuració de 140s2p. La distribució a l'interior de la caixa es pot veure a la *Figura 8.7* on s'aprecia una zona dedicada a les cel·les i una altra pels elements de protecció i connexions requerides per Normativa. El cablejat utilitzat a bateries és de control (com el que es pot veure a la *Figura 8.6*) i de potència, on s'utilitzen làmines d'alumini per a connexions de les cel·les a fusibles o relés i el cable descrit a l'apartat 6.2.1, utilitzat per connectar bateries amb els bus DC als inversors.

Figura 8.7 Vista d'una caixa de les caixes de bateries del CAT 07e

8.3.2. Refrigeració

A diferència del sistema de refrigeració emprat en els convertidors i motors, en el cas de les bateries, la refrigeració es realitza per convecció forçada d'aire a través de ventiladors instal·lats. El motiu principal de la tipologia de refrigeració és que fa el sistema més simple i segur.

La necessitat de la refrigeració es produeix per la dissipació de calor a les bateries, degut a la resistència interna associada a cada cel·la i a les pèrdues produïdes en els conductors de potència emprats, així com a les connexions. A més, les caixes van totalment tancades per seguretat i protecció, davant la possible entrada de partícules i/o aigua, fet que produeix una acumulació de calor en el seu interior que cal extreure, ja que les variacions de temperatura que es produirien, poden afectar negativament al comportament i funcionament de les cel·les (tenen un rang òptim de temperatura).

Tenint en compte la resistència interna de la cel·la i considerant el corrent màxim que pot patir una bateria, es determina:

$$P_{p,cel\cdot la} = R_{interna} \cdot I^2 = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{150}{2}\right)^2 = 11{,}25\ W \qquad \textbf{(8.11)}$$

Definint que la intensitat màxima aproximada que es pot donar són 150 A_{rms}, i amb la configuració establerta amb dos blocs paral·lels de cel·les, i per tant de resistències internes, el corrent total es

dividirà en les 2 branques, podent afirmar la hipòtesi, que el corrent màxim a circular per cada cel·la és de 75 A.

El valor determinat correspon a una cel·la. Considerant la totalitat d'aquestes i la hipòtesi d'unes pèrdues similars a totes elles:

$$P_{p,bateries} = P_{p,cel\cdot la} \cdot N_{cel\cdot les} = 11{,}25 \cdot 280 = 3{,}15\ kW \rightarrow P_{p,caixa} = \frac{3{,}15}{2} = 1{,}575\ kW \qquad \textbf{(8.12)}$$

La incorporació de ventiladors per a la refrigeració es fa tenint en compte unes restriccions:

- Un Package de bateries asimètric (les 2 caixes són diferents respecte els elements inclosos).
- Aïllar el màxim possible les caixes de l'exterior. Reduint els forats i possibles obertures.
- Aconseguir una distribució el més homogènia possible de les temperatures.
- Una bona distribució del flux d'aire.
- Màxima temperatura assolible per les cel·les de 60 ℃.
- Considerar una $T_{ambient}$ de 35 ℃ (condició de contorn), com a cas desfavorable.

Els ventiladors es situen a la tapa de les capses de bateries, en el buit deixat entre el monocasc i la pròpia zona reservada a la caixa. Els avantatges d'aquesta localització són dos:

- La corba que realitza el contorn del monocasc i carrosseries ajuda a la circulació d'aire a les caixes, permetent una renovació d'aire constant, des d'un punt de vista aerodinàmic.
- La forma i espai deixat entre monocasc i caixa, dificulta l'acumulació i arribada directa d'aigua a les caixes i concretament, a les cel·les. A més, les carrosseries fan d'obstacle a l'entrada d'aigua.

S'utilitzen dos ventiladors de flux axial a cada caixa, per a extreure el flux d'aire de l'interior a l'exterior, evitant així l'acumulació de la calor al seu interior.

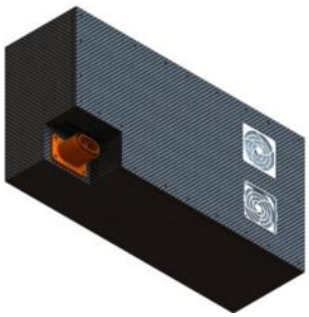


Figura 8.8 Disposició dels ventiladors en una de les caixes de bateries del CAT 07e

Els ventiladors s'utilitzen com a sortida de l'aire calent de les caixes i la connexió d'alta tensió es considera un punt viable per a l'entrada del flux d'aire. Mitjançant les simulacions realitzades [4], on es tenen en compte les restriccions abans comentades i les pèrdues per efecte Joule produïdes a les cel·les, es confirma la idoneïtat dels supòsits d'entrada i sortida de l'aire com a mètode de refrigeració de les bateries.

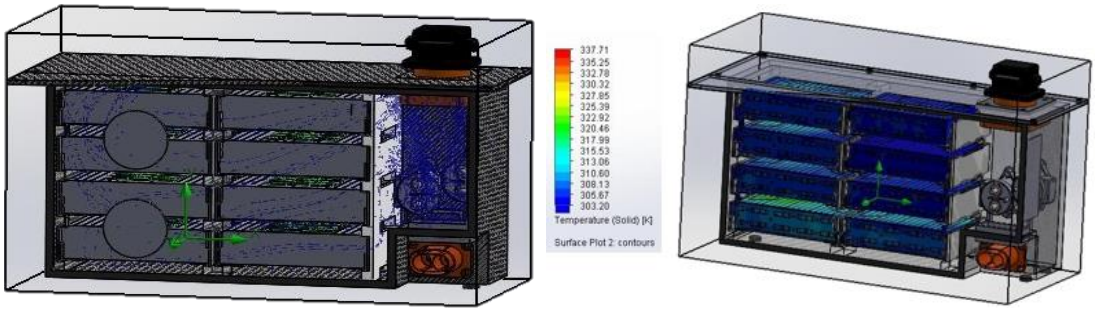


Figura 8.9 Entrada de flux d'aire (esquerra) i distribució de temperatures a una caixa (dreta)

Com es pot apreciar a la figura anterior, la distribució de temperatures marca uns màxims a les cel·les d'uns 47,3 ℃. Aquest valor es considera correcte des del punt de vista tèrmic ja que la temperatura màxima de treball de les bateries és de 60 ℃. A més, es pot observar que les temperatures més elevades es donen al stack inferior esquerra, que és la zona més allunyada del punt d'entrada de flux d'aire. Aquest fet es produeix perquè l'aire que arriba pel punt d'entrada de flux, ja ha patit un gradient de temperatura per les pèrdues dels primers stacks i per la dissipació a les connexions utilitzades. Per aquest motiu, els 2 ventiladors incorporats que extrauran l'aire calent de l'interior de la caixa, es localitzen a la zona contrària a l'entrada de flux, per garantir una contínua renovació de l'aire i afavorir una temperatura correcta a tots els stacks i connexions.

8.3.3. Proteccions

La Normativa de la Formula Student obliga a introduir certs elements de protecció i control de les bateries ja que són un element que al disposar d'alta tensió (600 V), poden suposar un risc pels usuaris que les han de manipular o pel pilot, quan el cotxe està en funcionament. Per això, a continuació es detallen els dispositius a instal·lar al voltant de les bateries per Normativa.

- Circuit de precàrrega

La funció del circuit és limitar el corrent d'entrada des de bateries als convertidors, passant pel condensadors principals, mentre es produeix l'augment de tensió al bus. Mitjançant aquest circuit RC, la càrrega dels condensadors és controlada, ja que amb la resistència equivalent inserida entre les bateries i condensadors, el sistema es comporta com un de primer ordre. Aquest circuit està format

per un relé NO (normalment obert) i una resistència. El relé es controla a partir d'un senyal digital de la centraleta principal del cotxe (dSPACE). Aquest es dimensiona per a unes necessitats elevades de tensió ($V_{bateries}$) ja que a nivell de corrent, es limita mitjançant la resistència del circuit.

S'utilitza un relé normalment obert ja que es requereix, per Normativa, que el sistema no estigui connectat inicialment, és a dir, la connexió bateries-convertidors no s'ha de produir fins que s'habiliti el sistema de tracció, moment en el que el tren de potència es trobarà connectat a alta tensió. D'aquesta manera s'aconsegueix seguretat pels usuaris que manipulen el cotxe i protecció dels elements, en cas de fallida. La resistència equivalent inclosa al circuit, limita el corrent com s'ha comentat, i es dimensiona en base a l'energia a dissipar durant la posada en funcionament del circuit.

Les expressions utilitzades per al dimensionament del circuit de precàrrega i compliment dels aspectes corresponents a la Normativa, tenint en compte el condensador principal utilitzat, són:

$$\%V_{bateries} = \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right) \cdot 100 \quad \textbf{(8.13)}$$

$$I(t) = \frac{V \cdot e^{\frac{-t}{RC}}}{R} \quad \textbf{(8.14)}$$

D'aquesta manera, es defineix els valors requerits de resistència, per aconseguir la càrrega d'un 90% en un temps reduït per Normativa i es calculen els corrents que haurà de suportar. A partir del programa realitzat (***Annex B***), es pot fer aquest dimensionament i obtenir els gràfics que visualitzin els resultats per un interval de temps, com es veu a la *Figura 8.10*.

Característica	Valor
Resistència	TE HSA 50 820 Ω
Configuració de resistències	3 blocs paral·lels de 2R en sèrie (2s3p)
Resistència total	546,67 Ω
Capacitat total	1400 µF
Model de relé	PD5 Tyco Electronics
Tipus de contacte del relé	Normalment obert
Límit corrent continu del relé	15 A
Rang de tensió del relé	2000 Vdc

Taula 8.4 Especificacions del circuit de precàrrega definit en el CAT 07e

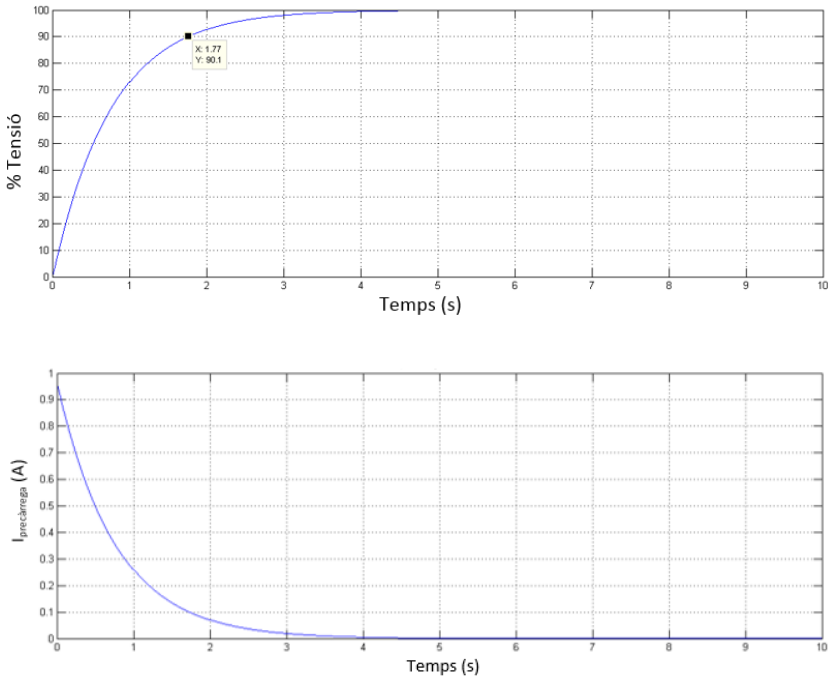


Figura 8.10 Gràfics del circuit de precàrrega

- AIRs i fusibles

Els AIRs (*Accumulator Isolation Relay*) és un tipus de relé normalment obert (NO) utilitzat per Normativa, que connecta i desconnecta les bateries dels convertidors DC/AC quan sigui necessari. Són normalment oberts, com el relé de precàrrega, per seguretat. D'aquesta manera es garanteix que fins que el cotxe no es troba amb el sistema de tracció encès (alta tensió entre bateries i convertidors) per al funcionament del cotxe, les bateries estaran desconnectades de la resta del tren de potència.

Han de complir unes necessitats i requeriments imposats per l'organització. A continuació, es mencionen alguns d'aquests:

- De la mateixa manera que els fusibles emprats, s'han de trobar separats de les bateries mitjançant un material elèctricament aïllant, com es veu a la *Figura 8.7*.
- El BMS ha de tancar el sistema de tracció, mitjançant l'obertura dels AIRs, si detecta valors crítics de tensió o temperatura de les cel·les.
- Cada recipient de bateries ha de contenir un fusible i dos AIRs.
- L'AIR ha de suportar els nivells de tensió i corrent màxims donats per bateries.

En cas de fallida o error en el sistema durant el funcionament del cotxe, aquests relés s'han d'obrir, aïllant les bateries de la resta d'elements del tren de potència. Per això, en el dimensionament, cal tenir

en compte que els AIRs han de poder tallar corrent de fins a 200 A (davant de possibles pics de corrent que es produeixin) i han de suportar els 600 V en continu, de tensió màxima de bateries.

Són relés controlats per senyal digital enviat des de la centraleta principal del vehicle (dSPACE).

La organització proposa exemple d'AIRs utilitzables en el cotxe. En el cas del CAT 07e s'utilitza el que es mostra a la *Figura 8.11*, Tyco Electronics Kilovac EV200, tenint en compte que al distribuir les cel·les en dues caixes, una a cada lateral, per Normativa es portaran quatre relés d'aïllament, dos a cada caixa.

Respecte al fusible més apropiat per utilitzar, s'han tingut diferents aspectes en compte:

- Com a element de protecció, s'ha de considerar les condicions de treball nominals i crítiques a nivell de corrent i tensió.
- Al trobar-se al cantó de les bateries, es tractarà d'una protecció DC, i per tant, s'analitzen els corrents de contínua nominal i màxim, el rang de tensió de treball i la corba I^2t.
- Es considera que per Normativa, la tensió màxima és de 600 V i el corrent màxim que es demanarà a bateries serà de 150 A (considerant les limitacions de potència en motors i convertidors i el rang de treball òptim).
- Finalment, es considera la corba I^2t per garantir que, en cas de fallida al sistema i superació dels límits elèctrics establerts, el fusible es fondrà abans que un altre element es faci malbé.

El model considerat apropiat per prestacions i costos és el model FWP-200A de Cooper Bussmann.

Figura 8.11 Relé d'aïllament (esquerra) i fusible (dreta) utilitzats al CAT 07e

- IMD (Insulation Monitoring Device)

El IMD és un dispositiu alimentat a 24 V (rang entre 10 i 36 V) que permet el control d'aïllament, a través de la resistència d'aïllament (500 Ω/V), entre conductors d'un sistema elèctric amb tensions en

el rang 0-1000 V i referència terra (xassís). El rang de temperatures de treball és entre -40 i 105 °C i el corrent màxim d'operació és de 500 mA.

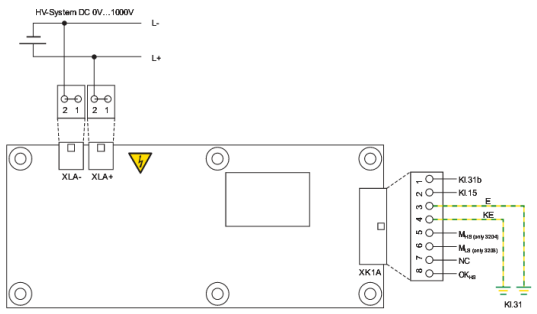
La organització recomana l'ús d'un model concret i és l'emprat per l'equip en el CAT 07e, un BENDER IR155-3204.

L'IMD s'encarrega d'obrir els AIRs en el cas que hi hagi un error d'aïllament o error d'IMD. L'acció sobre el relé és directa, sense la influència de cap lògica.

La tecnologia emprada per aquest dispositiu es basa en monitoritzar la separació entre el costat DC i AC, i les parts d'alt i baix voltatge. La interfície integrada proporciona els missatges d'error.

El dispositiu consisteix en una sortida d'estat, connectada a la centraleta principal del vehicle, que indica les bones condicions de treball (OK_{HS}) i una sortida de mesura, que senyala la resistència d'aïllament (M_{HS}). La condició de mesura està disponible com un senyal PWM en els terminals M_{HS} i M_{LS}. Els terminals E/KE van connectats a xassís a través de conductors diferents, per fer el sistema redundant i segur.

Un cop la potència s'encén (el vehicle està en estat de *Run* o funcionament), el dispositiu s'inicialitza i comença la mesura SST (*Speed Start Measuring*). L'IMD proporciona la resistència d'aïllament en un temps inferior a 2 segons i, posteriorment, comença la mesura DCP (Direct Current Pulse) en un temps inferior a 20 segons, amb la generació d'un puls imposat en el sistema, pels terminals de connexió a xassís i als terminals positiu i negatiu de bateries (L+/L-).



Connector XLA+
Pin 1+2 L+ Line voltage

Connector XLA-
Pin 1+2 L- Line voltage

Connector XK1A

Pin 1	Kl. 31b	Electronic ground
Pin 2	Kl. 15	Supply voltage
Pin 3	Kl. 31	Chassis ground
Pin 4	Kl. 31	Chassis ground (sep. line)
Pin 5	M_{HS}	Data Out, PWM (high side)
Pin 6	M_{LS}	Data Out, PWM (low side)
Pin 7	n.c.	
Pin 8	OK_{HS}	Status Output (high side)

Figura 8.12 Esquema elèctric proporcionat pel fabricant

- BMS (Battery Management System)

El BMS o AMS utilitzat en el CAT 07e és el Lithiumate Pro de Elithion. El sistema està format per dues parts: el dispositiu de control i gestió de bateries i les cel·les de l'AMS.

Les cel·les de l'AMS són les plaquetes (*Figura 8.6*) connectades als terminals positiu i negatiu de les bateries. Envien informació de tensió i temperatura de cada cel·la i del corrent de bateries, per comunicació CAN. A més, inclouen una resistència que permet fer el balanceig de les cel·les, per equilibrar l'estat de càrrega d'aquestes (tensió aproximadament igual a totes) i augmentar la vida útil.

El balanceig és un procés dut a terme a través de la gestió i control realitzat pel BMS, en el qual les cel·les es carreguen tenint en compte que la seva tensió màxima, definida pel fabricant, és 4,2 V. En el moment que una cel·la arriba al límit superior, es realitza el procés, on les cel·les a més tensió es descarreguen, per aconseguir un equilibri amb aquelles que s'han carregat fins a un voltatge inferior.

El panel de control BMS, es situa dins d'una caixa subjectada a una de les caixes de bateries. Els motius que porten a aquesta localització són: l'espai reduït present dins les caixes degut als altres components de protecció inserits i a la facilitat i seguretat que proporciona situar-lo fora, per a la seva manipulació i estudi. Aquest unitat de control va connectada via CAN a la centraleta principal del cotxe, on es guarden les diferents dades proporcionades pel BMS.

Figura 8.13 BMS utilitzat en el CAT 07e

Amb el BMS es monitoritzen els 8 stacks de cada caixa. Per tant, permet el control dels 16 stacks a través de 8 banks (un parell d'stacks) definits al dispositiu.

El vehicle elèctric CAT 07e disposa d'altres elements considerats de protecció com els que es llisten a continuació:

- Interruptor d'inèrcia.
- Polsadors per parar el cotxe.
- El dispositiu (fusible) de desconnexió de l'alt voltatge (HVD).

Aquests són alguns dels elements físics de seguretat, dirigits per unitats i senyals electrònics. La seva explicació i integració queden fora de l'abast del projecte, al ser elements de protecció general del vehicle, controlats per elements de la secció d'electrònica.

9. Programa de càlcul Tren de potència

El programa s'ha realitzat amb l'eina GUI (Graphical User Interface), del software Matlab. Tenint en compte l'estudi de disseny realitzat, així com l'experiència en els documents realitzats a l'equip, es decideixen les parts o elements a integrar en el programa que requereixen d'un procés de càlculs (definició i dimensionament), anàlisi (simulacions i gràfics) o aprenentatge. Segons aquests criteris, les opcions que es poden trobar al programa són:

- Configuració de les bateries al cotxe, segons les especificacions del model i fabricant emprat. Realització de càlculs de potència, energia, temps de descàrrega, volum i pes...
- Dimensionament del bus de contínua. Determinar l'esquema RC dels circuits de precàrrega i descàrrega explicats, així com els condensadors del bus de contínua. A més, com afegit, es pot trobar un càlcul dels condensadors de protecció de semiconductors, *snubbers*.
- Càlculs referents als convertidors DC/AC i motors de dimensionament, potència i pèrdues.
- Relacionat al punt anterior, es poden calcular temperatures d'elements dels convertidors.
- Conèixer la màquina d'estats del vehicle i com afecta cada element involucrat.
- El control. A través dels models de Simulink de control del parell (FOC) i de l'estimació de la posició del rotor, es pot analitzar la resposta dels sistemes als canvis de certs paràmetres.

Mitjançant aquesta eina es dissenyen les diferents pantalles del programa a realitzar, segons:

- L'aspecte visual que es vulgui donar a cada finestra de l'aplicació.
- Els elements que siguin necessaris introduir (botons, finestres d'introducció de valor, finestres de text, imatges, gràfics, etc.).
- Les variables i paràmetres a tenir en compte. Aquestes s'hauran de definir segons un nom o *Tag*.

La mida i distribució de les diferents pantalles, s'ha fet segons les opcions de càlcul i requeriments de cada part del tren de potència. A continuació, es pot apreciar la fase de disseny i realització d'una de les finestres del programa i la seva forma final:

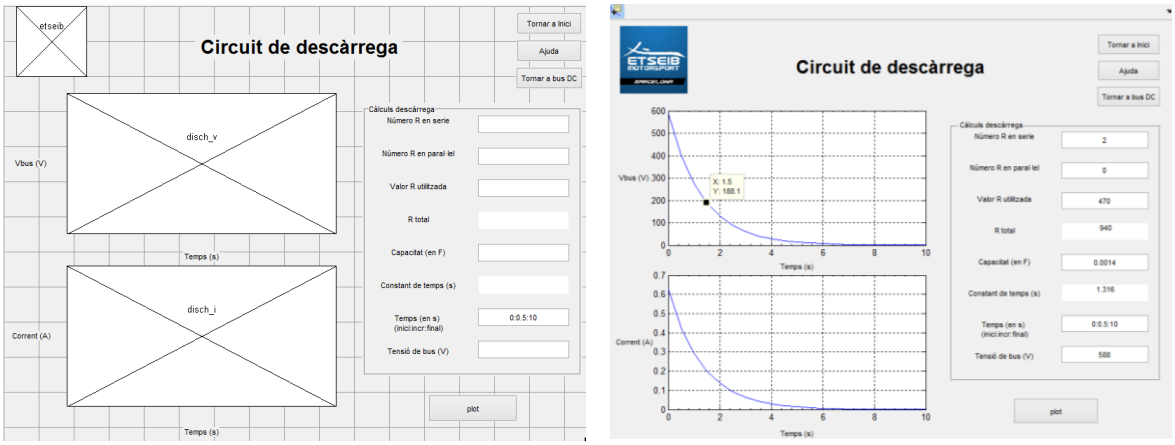


Figura 9.1 Exemple de finestra en fase de disseny (esquerra) i en fase d'ús (dreta)

Un cop dissenyades les diverses finestres, cada variable ha de tenir un nom assignat per poder fer referència a cada una d'elles en la part d'implementació del codi, que permet la realització dels diferents càlculs, simulacions i gràfics.

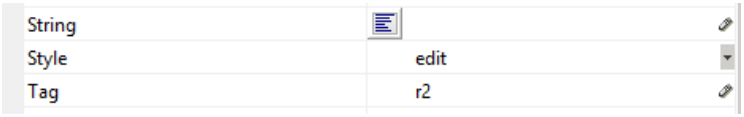


Figura 9.2 Inspector. Part de la taula de característiques dels elements creats a GUI

Com es veu a la *Figura 9.2*, i com s'ha esmentat anteriorment, cal assignar un nom a cada variable o element que pugui influir o s'hagi de modificar per a la realització dels càlculs i simulacions pertinents. *Tag,* correspon a l'etiqueta donada a un cert element o paràmetre per referir-se, a través d'aquesta, en el codi. *String,* permet definir allò que al inicialitzar la finestra, apareix a cada casella (en el cas concret de la *Figura 9.2*, es troba en blanc i per tant, en ella no hi haurà res, preparada per a la introducció d'un valor). *Style,* permet definir el tipus de casella que necessitem en cada cas: una casella de text editable o fixa (per indicar el nom o unitats d'un paràmetre), una barra *slider* que permeti variar un valor concret, un desplegable, un botó de clic, un llistat…

Definit el disseny de les pantalles del programa i les variables requerides en cada cas (arxiu .fig), s'ha de procedir a implementar el codi que permeti realitzar les operacions necessàries (arxiu .m).

El codi depèn de les necessitats de cada part del programa. La gran majoria del codi implementat es basa en la realització de càlculs bàsics i expressions específiques, estructures d'alternança (if/else) i

iteració i assignació de valors. A més, es realitzen les operacions per obtenir gràfics i simular sistemes de Simulink.

A continuació, es presenten parts significatives del codi que mostren les diferents estructures i comandes utilitzades per a dur a terme el programa.

```
function vp1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to vp1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of vp1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of vp1 as a
double
vp1=str2double(get(handles.vp1,'String'));
vp2=str2double(get(handles.vp2,'String'));
vp3=str2double(get(handles.vp3,'String'));
c3=str2double(get(handles.c3,'String'));
set(handles.vp5,'String',num2str(vp1*vp2*vp3*c3));
```

Quan s'afegeix un element en la finestra de disseny, al guardar, es genera una funció Callback amb el nom donat a aquell element, com a variable. Aquesta funció contindrà el codi i operacions que afectin a la variable que fa referència, per aconseguir que la seva actualització (canvi del valor) o el d'altres variables, proporcionin el resultat correcte. Posteriorment, es poden veure algunes comandes com:

- handles. Fa referència a una estructura. És l'etiqueta que permet identificar i referir-se a una variable.
- get. És la comanda que permet obtenir el valor d'un paràmetre d'entrada.
- str2double. Al fer la comanda get, es pot apreciar que s'obtindrà un 'String' (cadena d'elements), no un número que es pugui manipular. Amb aquesta acció es transforma l'String de l'element identificat amb el handles, en un número per fer operacions.
- set. És la comanda per establir un resultat o valor a una variable de sortida. En l'exemple presentat, s'assigna a l'String de l'element identificat vp5, una operació que correspon al producte de vp1, vp2, vp3 i c3 (altres elements).
- num2str. Operació inversa a str2double. Transforma el càlcul fet (número) en una cadena d'elements (String) que apareixerà a la casella de l'element de sortida.

Amb l'exemple presentat, es calcula el volum total de bateries, tenint en compte que vp1, vp2 i vp3 són les tres cotes de les cel·les i c3 és el número total de cel·les utilitzades en la configuració definida.

A continuació, es presenta el codi implementat per obtenir un gràfic a partir d'una expressió concreta, fent clic a un pushbutton (tipus d'element que al clicar-lo farà les accions establertes a la seva funció):

```
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
```

```
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
rp4=str2double(get(handles.rp4,'String'));
tau=str2double(get(handles.tau,'String'));
vo=str2double(get(handles.vo,'String'));
t = eval(get(handles.time,'String'));
 % Calculate data
n=length(t);
for i = 1:n
x(i) = 100*(1-exp(-t(i)/tau));
y(i) = (vo/rp4)*exp(-t(i)/tau);
end
% Create voltage discharge plot in proper axes
plot(handles.prech_percent,t,x)
set(handles.prech_percent,'XMinorTick','on')
set(handles.prech_percent,'XGrid','on')
set(handles.prech_percent,'YGrid','on')
```

En aquest exemple, s'introdueixen altres comandes com:

- L'estructura iterativa (for). Es defineix l'actualització a cada valor d'i, d'un vector de temps, que permet obtenir el resultat de les expressions x(i) i y(i), per representar-les.
- plot. Eina per obtenir un gràfic a través d'una expressió. Es demana representar a l'etiqueta prech_percent (un element axis de dibuix) la variable t a l'eix X (el temps) i la variable x(i) a l'eix Y, corresponent a una fórmula utilitzada per definir el circuit de precàrrega.

Finalment, com a última mostra de codi, es presenta una estructura alternativa (if) del càlcul d'una resistència equivalent, tenint en compte el valor nominal de la resistència utilitzada i si els elements estan en sèrie, paral·lel o ambdós casos, el qual afecta en el valor resistiu final.

```
if rp2 == 0
    set (handles.rp4,'String',num2str(rp3*rp1));
elseif rp1==0
    set (handles.rp4,'String',num2str(rp3/rp2));
elseif rp1==0 && rp2==0
    set(handles.rp4,'String',num2str(0));
elseif  rp1~=0 && rp2~=0
    set (handles.rp4,'String',num2str((rp3*rp1)/rp2));
end
```

Afegir que l'estructura de les diferents finestres és similar respecte al codi emprat, variant únicament la corresponent al Control, al requerir de l'enllaç entre GUI i Simulink com es pot veure a l'arxiu .m. Aquest aspecte correspon a les pantalles de lectura de posició i control de parell, del programa adjuntat al CD (suport informàtic). L'explicació de cada pantalla i part del programa, així com l'ús i descripció del mateix, es troba desenvolupat a l'***Annex B***.

10. Anàlisi econòmic

En el desenvolupament del present projecte, cal tenir en compte dos blocs en l'estudi econòmic referent a aquest: Recursos del projecte i recursos materials del disseny i muntatge (costos).

En els recursos del projecte, es tenen en compte les hores dedicades per l'estudiant del projecte final de carrera en l'estudi, la redacció del document i la realització del Programa de càlcul de Tren de potència ETSEIB Motorsport. A més, es tenen en compte les partides dedicades a temps d'estudi dels conceptes elèctrics i les hores de dedicació per a l'elaboració del disseny, per part de la secció de tren de potència de l'equip. A la *Taula 10.1* es presenten els costos associats a aquest bloc.

Activitat	Hores	Preu per hora	Cost
Estudi elèctric del tren de potència	240 h	20 €/h	4800 €
Disseny	320 h	25 €/h	8000 €
Redacció	120 h	10 €/h	1200 €
Realització del programa de càlcul	180 h	25 €/h	4500 €
Cost activitat			***18500 €***

Concepte	Preu
Llicències de software	
- Matlab	1800 €
- SolidWorks	1500 €
- Code Composer	800 €
- Altres	500 €
Ordinador	600 €
Material d'oficina	10 €
Cost concepte	***5210 €***

Energia	Consum	Hores	Preu per kWh***	Cost
Electricitat (Ordinador i habitabilitat)	100 W	560h	0,130022 €/kWh	7,28 €
Cost energètic				***7,28 €***
COST TOTAL				***23717,28 €***

Taula 10.1 Costos dels recursos del projecte

A continuació, es presenten els recursos materials de disseny i muntatge del cotxe elèctric CAT 07e.

Dins d'aquest pressupost es tenen en compte els components elèctrics analitzats al projecte, corresponents al Tren de potència. Queden fora del càlcul de costos i abast del pressupost elements com:

- Components i proteccions unides a la part d'electrònica (Unitats de control electrònic, botons d'interrupció i inèrcia, centraleta principal...).
- Elements mecànics de subjecció al cotxe i d'unió a aquest (Cargols, suports, volanderes...).
- Elements estructurals i/o d'integració de les parts elèctriques al vehicle (caixes de bateries, capses de polietilè per al muntatge d'stacks...).

Donat que és una part que optimitza el funcionament dels elements elèctrics i que és necessari per al correcte manteniment dels components durant el funcionament del cotxe, es té en compte la refrigeració. A la *Taula 10.2* es presenten els costos associats a aquest bloc [4].

Component, material	Unitats	Preu unitari	Cost
Motor	2	15000 €	30000 €
Convertidors DC/AC*	1	6350 €	6350 €
Cel·les de Bateries**	300	23 €	6900 €
IMD**	2	330 €	660 €
BMS			
- Centraleta electrònica Master	1	1000 €	1000 €
- Plaquetes de control per BMS**	200	10 €	2000 €
Fusible	2	210 €	420 €
AIR	4	150 €	600 €
Circuit de precàrrega			
- Relé	1	15 €	15 €
- Resistència	6	2,5 €	15 €
Circuit de descàrrega			
- Relé	1	15 €	15 €
- Resistència	2	11 €	22 €
Cablejat	-	-	260€
Connectors			
- De potència (mascle i femella)	3	440 €	1320 €
- De control (mascle i femella)	10	40 €	400 €
Refrigeració			
- Ventiladors bateries	4	8 €	32 €
- Ventiladors radiador	2	12 €	24 €
- Radiador	1	35 €	35 €

- Bomba	1	20 €	20 €
- Tubs de circulació d'aigua	-	8 €	8 €
- Brides i connectors	-	90 €	90 €

Cost Material			***50186 €***
Concepte	**Hores**	**Preu per hora**	**Cost**
Hores de muntatge i proves	360 h	25 €/h	9000 €
Eines	-	-	750 €
Soldador i material corresponent	-	-	100 €
Cost Concepte			***9850 €***
Energia	**Consum**	**Hores**	**Cost**
Electricitat (Ordinadors i habitabilitat)	900 W	680 h	79,6 €
Electricitat (Càrrega del CAT 07e)	~ 4.5 kWh per càrrega (unes 15 en l'any)		8,8 €
Cost Energètic			***88,4 €***
COST TOTAL			***60124,4 €***

Taula 10.2 Costos dels recursos materials del disseny i de muntatge

*En els convertidors DC/AC s'ha considerat el cost corresponent als components que el formen, és a dir, el cost material del producte establert per l'antic membre de l'equip que els va dissenyar i muntar [2].

**Components dels quals es van comprar unitats de més, com a marge de seguretat.

***S'ha utilitzat una tarifa corresponent al terme energètic d'una companyia elèctrica.

Finalment, el cost global del projecte tenint en compte la part d'investigació, disseny, muntatge dels diferents components, la fase de proves i el desenvolupament del programa de càlcul (amb els diferents factors i elements implicats, llistats a les taules) és superior a 85000 €. Tenint en compte que aquest és el cost referent només a una de les 5 seccions que formen el projecte, suposaria un pressupost anual bastant elevat, però cal tenir en compte diferents factors respecte a aquest fet. Alguns d'aquests són:

- El tren de potència significa un tant per cent molt important del cotxe en el seu funcionament i pes. Per tant, cal una inversió important del pressupost disponible en aquesta part, per optimitzar les prestacions i millorar cada temporada.

- L'equip ETSEIB Motorsport actua com a empresa i com a equip de competició, punt que inclou la opció d'establir acords de patrocini de diferent tipus, que permetin negociar el preu final de les diferents necessitats i productes.
- S'ha de valorar que l'equip no renova tot el conjunt elèctric, i en general, tots els elements que formen el cotxe cada temporada, si no que d'un any a l'altre, estudia quins components cal millorar o canviar i quins es poden mantenir per al projecte següent. D'aquesta manera el pressupost no és a un any vista, si no en un període més extens. Un exemple, és el model de motor elèctric utilitzat, el qual s'ha emprat durant 3 anys (del CAT 05e al CAT 07e).

Conclusions

El coneixement i l'anàlisi de les parts del tren de potència del cotxe i la participació en aquest, han permès cobrir un dels objectius principals del PFC: explicar i justificar el disseny i model del CAT 07e. A més, aquesta estudi i treball dins de l'equip, han permès complir l'altre objectiu principal del PFC: conèixer més en profunditat l'eina i programa Matlab, i realitzar un programa de càlcul i disseny del Tren de potència en forma d'interfície gràfica, on poder fer càlculs, dimensionaments i simulacions aproximades i intuïtives. Respecte al disseny del tren de potència es pot concloure que:

L'estudi i selecció del motor compleixen les prestacions requerides per la seva tecnologia, però al no estar dissenyat per aquesta aplicació, aspectes com la potència i el volum no són competitius vers altres opcions de mercat. Respecte els convertidors DC/AC, s'ha aconseguit millorar el funcionament del CAT 06e al CAT 07e, en termes de potència i fiabilitat. Al tractar-se d'uns inversors no comercials i fets per un ex-membre, el traspàs de coneixement i treball en ells per millorar i solucionar possibles problemes, suposa un handicap a la competició. A més, malgrat la seva qualitat i competitivitat, cal seguir unes línies de millora (com la relació potència-pes) per corregir errors i aspectes presents. Finalment, la investigació, elecció i dimensionament de les bateries utilitzades han complit les expectatives de treball, i per això, són part a mantenir pel projecte CAT 08e.

Aquest disseny ha permès obtenir bons resultats a les competicions, malgrat les dificultats presents, acabant per primer cop la prova principal (Endurance), des de que a l'equip de l'Escola es treballa amb el vehicle elèctric. El treball i temps dedicat, en la temporada del CAT 07e i en aquest projecte, han permès assolir un objectiu encara més gran: ampliar el coneixement en el sector de l'automoció, des del punt de vista de l'enginyeria i consolidar conceptes treballats durant els últims anys.

Futures línies de treball

Pel que fa al disseny, a part de l'esmentat anteriorment, per assolir una major competitivitat a les proves, caldria modificar els motors amb opcions més adients com: ús de motor únic amb diferencial, motor integrat a roda o ús d'un fabricant més orientat al sector. Respecte el convertidor, caldria treballar paral·lelament en els del CAT 07e, mentre s'utilitza un comercial per garantir el funcionament.

Respecte al programa fet, caldria optimitzar el codi implementat, facilitant el mètode de càlcul. També es podria optar per afegir altres necessitats de disseny o millorar les existents, així com les simulacions, aprofundint en el coneixement dinàmic, mecànic i elèctric per establir paràmetres, als models emprats, com: inèrcies, pes, resistències externes, factors generals per fer més òptims i reals els càlculs i simulacions...

Agraïments

Primerament, m'agradaria agrair als professors Francesc Roure, Lluïsa Jordi i Neus Cónsul, involucrats amb el projecte Formula Student, l'oportunitat d'haver format part de l'equip ETSEIB Motorsport durant el projecte CAT 07e, així com als professors de suport que ens han ajudat i donat consell a les diferents seccions sempre que ha estat necessari.

Especialment, agrair al professor de suport de la secció de Tren de potència i director d'aquest projecte final de carrera, Daniel Montesinos, tant pel recolzament i ajuda donada a la secció durant la temporada 2013-2014 com durant la realització del projecte amb consells, crítiques i opinions per tal de millorar.

Als membres, companys i amics de l'ETSEIB Motorsport durant la temporada del CAT 07e que, a més d'ajudar-me en certs aspectes relacionats al projecte, van fer que aquest projecte fos una experiència increïble, enriquidora i inoblidable.

A en Jordi Abante, pels mesos de dedicació conjunta a millorar els convertidors per fer, d'aquest cotxe, un vehicle més fiable i competitiu, a més de tot el coneixement que em va transmetre durant aquell temps tant referent als convertidors del CAT 07e, com de l'electrònica de potència i de l'àmbit elèctric en general.

Finalment, agrair als meus amics de la Universitat i als que porten molts anys al meu costat, pels moments viscuts i el continu recolzament donat al llarg d'aquests anys i sobretot, a la meva família, les persones que sempre es mantenen al meu costat (estiguin o no avui dia), pel suport incondicional i confiança dipositada en mi, en aconseguir els meus objectius.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

[1] Normativa Formula Student

[2] ABANTE LLENAS, J. *Disseny, control i implementació d'un inversor trifàsic per un vehicle elèctric,* Projecte Final de Carrera, Barcelona: ETSEIB. 2014

[3] SAINZ, L.; CÓRCOLES, F.; PEDRA, J. *Fundamentos de Máquinas Parte I*. Barcelona. ETSEIB-CPDA. 2011

[4] Documents pertanyents a l'equip de Formula Student, ETSEIB Motorsport, UPC. 2011-2014

[5] STAEBLER, M. *TMS320F240 DSP Solution for Obtaining Resolver Angular Position and Speed.* Texas Instruments. 2000

[6] HUSAIN, I. *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*. CRC Press. 2003

[7] WINTRICH, A.; [et al.]. *Application Manual Power Semiconductors*. Semikron. 2011.

[8] M. MILLER, J. *Propulsion Systems for Hybrid Vehicles*. IET Power and energy series 45. The Institution of Engineering and Technology. 2008

[9] EHSANI, M.; GAO, Y.; EMADI, A. *Modern electric, Hybrid electric and Fuel Cell Vehicles* Second Edition*,* CRC Press Taylor and Francis Group.

[10] Datasheet *Driver 2SP0115T*

Bibliografia complementària

[11] BERGAS I JANÉ, J. *Control del motor d'inducció considerant els límits del convertidor i del motor.* Universitat Politècnica de Catalunya. 2000

[12] CHANDANA PERERA, P.D. *Sensorless Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives.* Institute of Energy Technology, Aalborg University. 2002

[13] KRAUSE, P.; WASYNCZUK, O.; SUDHOFF, S. *Analysis of electric machinery.* IEEE Press. 1994.

[14] MOHAN, N.; UNDELAND, T.; ROBBINS, W. *Power Electronics. Converters, Applications and Design*. John Wiley & Sons. 2003.

[15] BOIX, O.; [et al.]. Professors del Departament d'Enginyeria Elèctrica ETSEIB-UPC. *Tecnologia Eléctrica Segunda Edición.* Editorial Técnica CEYSA

[16] Apunts corresponents a les assignatures d'electrònica i de la intensificació elèctrica relacionats amb la temàtica del projecte