

## Resum.

En els darrers anys, la *Formula Student* ha rebut un gran suport per part de les empreses que ha permès fer un pas gegant en quant a nivell de tecnologia utilitzada en aquesta competició. Tot i tractar-se d'una competició a nivell universitari, gairebé tots els equips intenten diferenciar-se de la resta utilitzant les últimes evolucions tecnològiques. Sobretot queda palès amb la categoria de monoplaques elèctrics, que han passat de ser minoria a la competició a ser tendència. Cada any augmenta el nombre d'universitats que es decanten per aquesta categoria, i ara ja superen per prestacions als vehicles de combustió interna.

Des de l'any 2012 a l'equip de *Formula Student* de l'Escola, ETSEIB Motorsport, s'ha optat per a dissenyar un monoplaça que competeixi a la categoria de propulsió elèctrica. Per tal de seguir evolucionant i millorar les prestacions globals del monoplaça, l'any 2014 es va decidir que després de dues edicions de la competició l'objectiu més important seria millorar les bateries.

L'objectiu d'aquest projecte arrela amb la necessitat de fer aquest canvi, sobretot per reduir pes al monoplaça i alhora de disposar de més energia per finalitzar l'*Endurance*, la prova de resistència de la competició. Per això ha estat necessari un estudi de tecnologies i tipus de bateries disponibles al mercat, un dimensionament elèctric per saber les necessitats energètiques i prestacions que ha de poder subministrar la bateria. També s'ha elaborat una validació experimental del model de cel·la escollit.

Aquesta tria de bateries es va realitzar per a dos anys vista, ja que seria una inversió econòmica important i de cara a 2015 la intenció era renovar la resta de la secció de tren de potència, motors i inversors. Per tant, un factor important a tenir en compte era que fossin molt versàtils, de manera que es poguessin adaptar a diferents sistemes de propulsió.

A més, la bateria està monitoritzada per un *Battery Management System*, BMS, que s'encarrega de controlar la tensió de cada cel·la i la seva temperatura. Aquest projecte també engloba l'elecció d'aquest controlador de la bateria i la seva implementació durant dues edicions de la competició.

Finalment, també ha estat necessària l'adaptació del carregador a la nova bateria, tant a nivell de seguretat com per millorar les seves prestacions.



## Sumari.

<b>RESUM.</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI.</b>	<b>3</b>
<b>1. GLOSSARI.</b>	<b>7</b>
1.1. Símbols i variables.....	7
1.2. Llista de Figures.....	11
1.3. Llista de Taules.....	14
<b>2. PREFACI.</b>	<b>17</b>
2.2. Introducció a la Formula Student.....	17
2.3. La Formula Student a l'ETSEIB.....	18
2.4. Característiques de la competició.....	18
2.5. Origen del projecte.....	21
2.6. Motivació.....	21
<b>3. INTRODUCCIÓ.</b>	<b>23</b>
3.1. Objectius del projecte.....	23
3.2. Abast del projecte.....	23
<b>4. TRIA DE LES CEL·LES.</b>	<b>25</b>
4.1. Tipus de cel·les.....	25
4.1.1. Tipus de química. [8].....	26
4.1.2. Tipus de geometria.....	28
4.2. Prestacions elèctriques.....	30
4.3. Necessitats i disseny elèctric de la bateria.....	32
4.4. Model de cel·la escollit.....	34
4.5. Validació experimental.....	39
4.5.1. Metodologia i realització de les descàrregues.....	39
4.5.2. Observacions.....	47
4.6. Adaptació al CAT08e.....	48
4.6.1. Canvis en el tren de potència.....	48
4.6.2. Reestructuració de la bateria.....	52
<b>5. BMS</b>	<b>59</b>
5.1. Introducció.....	59
5.2. Característiques bàsiques.....	59

5.2.1.	Control de la tensió i la temperatura de les cel·les.....	59
5.2.2.	Càlcul del <i>State of Charge</i> . [11] .....	60
5.2.3.	Balanceig de les cel·les. ....	61
5.2.4.	Comunicació amb la <i>Main Ecu</i> del monoplaça. ....	64
5.3.	Tipus de BMS.....	64
5.3.1.	BMS centralitzat. ....	64
5.3.2.	BMS descentralitzat. ....	65
5.4.	Tria del BMS.....	65
5.4.1.	Situació inicial. [7].....	65
5.4.2.	Conclusions experimentals.....	67
5.4.3.	Nous objectius.....	69
5.4.4.	Freemens Battery Management System. ....	70
5.4.5.	Taula comparativa de BMS.....	73
5.4.6.	Instal·lació del sistema. [14].....	74
<b>6.</b>	<b>ADAPTACIÓ DEL CARREGADOR A LA BATERIA DEL CAT08E.</b> _____	<b>78</b>
6.1.	Presentació del carregador. [15].....	78
6.2.	Adaptació del carregador. ....	79
6.2.1.	Canvis a realitzar.....	79
6.2.2.	Implementació dels canvis.....	82
<b>7.</b>	<b>CARACTERÍSTIQUES I RESUM DE LES DUES ETAPES.</b> _____	<b>85</b>
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONS.</b> _____	<b>87</b>
8.1.	Anàlisi de resultats .....	87
8.2.	Futures línies de treball.....	88
<b>9.</b>	<b>ESTUDI ECONÒMIC.</b> _____	<b>89</b>
9.1.	Recursos humans.....	89
9.2.	Recursos materials. ....	90
9.2.1.	Transport i impostos. ....	90
9.3.	Recursos de desenvolupament. ....	91
9.4.	Cost total del projecte. ....	92
<b>10.</b>	<b>IMPACTE AMBIENTAL.</b> _____	<b>93</b>
10.1.	Bateries.....	93
10.2.	Aparells electrònics.....	94
10.3.	Recursos energètics.....	94
<b>11.</b>	<b>PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE.</b> _____	<b>96</b>

---

<b>AGRAÏMENTS.</b>	<b>97</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.</b>	<b>98</b>
Referències bibliogràfiques. ....	98
Bibliografia complementària. ....	99



# 1. Glossari.

## 1.1. Símbols i variables.

ADC: Analogic to Digital Conversion.

Air: Accumulator Isolator Relay. Relé d'aïllament de la tensió de la bateria.

Android: Programari per a telèfons mòbils que inclou un sistema operatiu, programari intermediari i aplicacions.

BMS: Battery Management System.

Buck: Tipus de convertidor que redueix la tensió i augmenta el corrent.

C: Capacitat (Ah).

$C_{\text{cel·la}}$ : Capacitat de la cel·la (Ah).

$C_{\text{max}}$ : C's màximes de descàrrega.

CAN bus: Controller Area Network bus.

CC/CV: Constant Current/Constant Voltage. Corrent constant/Voltatge constant.

CITCEA: Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments.

$d_{\text{cel·la}}$ : Densitat de la cel·la (Ah/g).

DC-DC: Direct Current – Direct Current. Conversió corrent contínua – contínua.

E: Energia (J).

$E_{\text{bateria}}$ : Energia de la bateria (kWh).

$E_{\text{consumida}}$ : Energia consumida en una prova de resistència (Wh).

EMI: Electromagnetic interference. Interferències electromagnètiques.

Endurance: Prova de resistència.

ETSEIB: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.

EUETIB: Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona.

$f_{pic}$ : Factor de pic.

FS: Formula Student.

FSAE: Formula of Society of Automotive Engineers.

GND: Ground. Terra.

HV: High Voltage. Alt voltatge, considerat superior de 60 V.

I: Intensitat (A).

$I_{càrrega}$ : Intensitat de càrrega de les bateries (A).

$I_{imposada}$ : Intensitat imposada com a màxima del circuit (A).

$I_{max}$ : Intensitat màxima (A).

IMD: Insulation Monitoring Device.

IMD-OK: Senyal que envia el Insulation Monitoring Device si tot és correcte.

Li-Po: Liti – Polímer. Química de cel·les general.

LiCoO<sub>2</sub>: Composició química de cel·les.

LiFePO<sub>4</sub>: Composició química de cel·les.

Li<sub>2</sub>MnSiO<sub>4</sub>: Composició química de cel·les.

LV: Low voltage. Baix voltatge, considerat inferior a 60 V.

$m_{cel·la}$ : Massa de la cel·la (g).

$m_{bateria}$ : Massa de la bateria (kg).

Main ECU: Centraleta principal del monoplaça. És una centraleta dSpace.

Master: Centraleta principal del BMS. Rep dades i realitza els càlculs del SOC, a més d'enviar missatges d'errors.

MicroSD: Tipus de memòria Flash.



Mid-Banks: Slaves situades a la part intermitja d'un Stack. És una denominació segons el BMS d'Elithion.

MPLAB PICkit3: Programador del BMS de Freemans.

N: nombre de cel·les.

$N_{\text{paral·lel}}$ : nombre de cel·les en paral·lel.

$N_{\text{serie}}$ : nombre de cel·les en sèrie.

Ni-Cd: Níquel – Cadmi. Química de cel·les.

Ni-MH: Níquel – Hidrur metàl·lic. Química de cel·les.

NTC: Negative Temperature Coefficient. Sensor de temperatura.

OCV: Open Circuit Voltage. Tensió de la bateria en un circuit obert (sense circulació de corrent).

$P_{\text{max}}$ : Potència màxima (W).

PP: Polipropilè.

PE: Poliestiré.

SC: Safety Circuit.

Slave: Centraletes esclaves del BMS. Fan el censat de temperatura i tensió i envien la informació a la Master.

SOH: State of Health. Estat de salut de la bateria.

SOC: State of Charge. Estat de càrrega de la bateria.

$SOC_v$ : State of Charge (voltage based). Estat de càrrega.

$SOC_c$ : State of Charge (current based). Estat de càrrega.

Stack: Divisió física d'un conjunt de cel·les que formen el conjunt de la bateria.

Q: Capacitat de la cel·la (Ah).

R: resistència ( $\Omega$ ).

$R_{\text{total}}$ : resistència total del circuit de HV ( $\Omega$ ).

t: Temps (s).

$t_{\text{càrrega}}$ : temps de càrrega de la bateria (s).

U(t): Tensió en funció del temps.

$U_{\text{max bateria}}$ : Tensió màxima de la bateria (V).

$U_{\text{max cel·la}}$ : Tensió màxima de la cel·la (V).

$U_{\text{min bateria}}$ : Tensió mínima de la bateria (V).

$U_{\text{min cel·la}}$ : Tensió mínima de la cel·la (V).

$U_{\text{nom bateria}}$ : Tensió nominal de la bateria (V).

$U_{\text{nom cel·la}}$ : Tensió nominal de la cel·la (V).

UPC: Universitat Politècnica de Catalunya.

Vdc: Voltatge de contínua.

Wi-Fi: Wireless Fidelity. Xarxa sense fils.

$\alpha$ : paràmetre entre 0 i 1, segons el pes que se li vulgui atribuir al  $\text{SOC}_V$  o  $\text{SOC}_C$ .

$\Delta U$ : Caiguda de tensió (V).

## 1.2. Llista de Figures.

Figura 2.1 Dimensions de la prova de l'Skid Pad. [4]	19
Figura 4.1 Cel·la cilíndrica, incorporada al CAT05e i CAT06e.	29
Figura 4.2 Cel·la prismàtica.	29
Figura 4.3. Cel·la de tipus sobre, incorporades al CAT07e i CAT08e.	30
Figura 4.4 Gràfiques de descàrrega a diferents C's. [1]	31
Figura 4.5 Dimensions de la cel·la. [3]	37
Figura 4.6 Model de cel·la escollit.	38
Figura 4.7. Càrrega electrònica utilitzada per a les realitzacions de la descàrrega.	39
Figura 4.8 Realització d'una de les descàrregues realitzades.	40
Figura 4.9 Descàrrega a 25 A.	41
Figura 4.10. Ampliació de la descàrrega a 25 A.	42
Figura 4.11 Detall de la recuperació de la tensió al acabar l'experiment.	43
Figura 4.12 Descàrrega a 35 A.	43
Figura 4.13 Descàrrega a 45 A.	44
Figura 4.14 Descàrrega a 55 A.	46
Figura 4.15 Energia emmagatzemada en cada experiment.	47
Figura 4.16 Temps per volta i totals de l' <i>Endurance</i> d'Alemanya l'any 2014. [6]	48

Figura 4.17 Motor Emrax 228 HV. _____	49
Figura 4.18 Corba de parell del motor Emrax 228 HV. [12] _____	50
Figura 4.19 Corba de parell del motor Mavilor MA-55. [13] _____	50
Figura 4.20 Inversor BAMOCAR D3 400-400 RS. _____	51
Figura 4.21 Planta del CAT07e. _____	52
Figura 4.22 Planta del CAT08e. _____	52
Figura 4.23 Bany de deposició de les partícules d'or. _____	56
Figura 4.24 Realització del xapat d'or. _____	57
Figura 5.1 Schematic simplificat de balanceig passiu. _____	63
Figura 5.2 Schematic simplificat de balanceig actiu. _____	63
Figura 5.3 Schematic del cablejat de BMS d'Elithion. _____	67
Figura 5.4 Connexió de la <i>Slave</i> proposada per Elithion. [7] _____	68
Figura 5.5 Connexió realitzada al CAT07e. _____	68
Figura 5.6 <i>Stack</i> realitzat a l'ETSEIB Motorsport. _____	69
Figura 5.7 Logotip de l'empresa del nou BMS. _____	70
Figura 5.8 Eina emprada per a la programació del BMS. _____	71
Figura 5.9 Sensor de temperatura utilitzat al BMS de Freemans. _____	71
Figura 5.10 Microprocessador emprat per controlar la tensió i el balanceig. _____	72
Figura 5.11 Schematic del microprocessador. [17] _____	72

Figura 5.12 Placa de protecció del BMS de Freemens (FreeSB-PR). [14]	73
Figura 5.13 Caixa de bateries del CAT08e.	74
Figura 5.14 Schematic de les connexions del BMS. [14]	74
Figura 5.15 PCB del BMS de Freemens.	75
Figura 5.16 Connexió del BMS amb la bateria.	76
Figura 5.17 Connexió recomanada pel fabricant. [14]	76
Figura 6.1 Horaris de la competició d'Alemanya 2014.	80
Figura 6.2 IMD utilitzat al CAT08e.	81
Figura 6.3 Schematic de connexió del IMD. [16]	82
Figura 6.4 Placa de control del carregador, amb els canvis realitzats marcats.	83
Figura 6.5 Missatge de CAN emprat al carregador.	84

### 1.3. Llista de Taules.

Taula 2.1 Puntuació de la competició d'Alemanya. [4]	20
Taula 4.1 Distribució dels pesos previstos del CAT08e.	25
Taula 4.2 Característiques dels diferents tipus de químiques de cel·les. [5]	28
Taula 4.3 Necessitats de la bateria de CAT07e.	34
Taula 4.4 Prestacions del model de cel·la escollit. [3]	36
Taula 4.5. Prestacions i característiques de la bateria.	38
Taula 4.6 Temps i corrent de cada experiment realitzat.	40
Taula 4.7 Càlcul energètic per a la descàrrega a 25 A.	42
Taula 4.8 Càlcul energètic de la descàrrega a 35 A.	44
Taula 4.9 Càlcul energètic de la descàrrega a 45 A.	45
Taula 4.10 Càlcul energètic de la descàrrega a 55 A.	47
Taula 4.11 Característiques del motor Emrax 228 HV. [12]	49
Taula 4.12 Característiques de la bateria de CAT08e.	54
Taula 5.1 Taula comparativa de Elithion i Freemens.	73
Taula 5.2 Senyals d'entrada i sortida de la placa de BMS.	75
Taula 5.3 Distribució de senyals per colors.	76
Taula 5.4 Distribució del BMS de Freemens a la bateria.	77

Taula 7.1 Comparativa de les característiques de la bateria. _____	85
Taula 7.2 Comparativa de les característiques d'ambdós BMS. _____	86
Taula 9.1 Recursos humans del projecte. _____	89
Taula 9.2 Recursos materials dedicats al projecte. _____	90
Taula 9.3 Recursos dedicats a impostos, taxes i transport. _____	91
Taula 9.4 Recursos dedicats al desenvolupament del projecte. _____	91
Taula 9.5 Cost total del projecte. _____	92
Taula 10.1 Elements que componen una cel·la. [3] _____	93
Taula 10.2 Consum energètic del projecte. _____	95





## 2. Prefaci.

### 2.2. Introducció a la Formula Student.

La *Formula Student* és una competició on les universitats d'arreu del món dissenyen i fabriquen monoplaques seguint la normativa de FSAE. El gran atractiu d'aquesta competició i que fa que cada any més universitats hi participin és la gran llibertat que permet la normativa per dissenyar el monoplaça, alhora de tenir una normativa molt estricta en elements de seguretat per garantir la integritat dels estudiants i de tot els membres de la competició.

La competició està dividida en dues grans categories, la de monoplaques de combustió interna i els monoplaques elèctrics. Tot i que aquesta última va començar essent una categoria minoritària, en aquests darrers anys està augmentant molt el nombre d'universitats que aposten per aquest tipus de prototips. Aquest fet és degut a que les marques d'automòbils estan apostant molt fort pels vehicles propulsats elèctricament, i dia a dia estan més presents al mercat actual.

Aquest es creu que serà el futur de l'automoció, forçat a veure's explotat per les següents causes, entre altres:

- L'augment del preu del petroli.
- L'alta contaminació als nuclis urbans.
- Els problemes ambientals que està patint el planeta Terra, com l'escalfament global.

Aquest augment dels vehicles elèctrics al mercat fa que estiguin en evolució constant, i tot i que els motors elèctrics existien abans que els de combustió interna i són més eficients, el gran problema d'aquesta forma de mobilitat recau en l'autonomia. És per això que les bateries estan agafant molt de protagonisme. S'està destinant molts esforços en la investigació de noves tecnologies per tal de millorar la densitat d'energia, és a dir, reduir el pes de les bateries i augmentar l'autonomia dels automòbils.

La Formula Student té molta importància en aquest sector del desenvolupament de la propulsió elèctrica. Moltes empreses destinen els nous prototips de motors, controladors i bateries a fer proves en aquesta competició. Així es crea un vincle d'ajuda mútua entre empreses i universitats i acosta la frontera que hi ha entre elles. Per una banda, la col·laboració de les empreses abarateix les aportacions econòmiques per part de la

universitat i permet adquirir uns coneixements més especialitzats que no s'assoleixen a classe. Per altra banda, les empreses estan més en contacte amb estudiants, i permet donar-se a conèixer abans que aquests accedeixin al món laboral. També permet provar els nous prototips i eines de treball, i adquirir coneixement del comportament en competició.

### **2.3. La Formula Student a l'ETSEIB.**

L'Escola Tècnica d'Enginyeria Industrial de Barcelona va començar a prendre part en aquesta competició oficialment l'any 2007 amb el CAT01 en la categoria de monoplaques de combustió. L'any anterior uns membres de l'Escola es van veure atrets per aquesta competició i van decidir participar-hi pel seu compte. Una de les normes de la competició és la participació sota el nom d'una universitat, així que després d'ensenyar a l'Escola el que es pretenia amb el monoplaça dissenyat, van accedir a deixar participar els alumnes amb el nom de ETSEIB Motorsport amb el que anys després seria l'anomenat CAT00.

L'any següent l'Escola va voler donar un recolzament més gran al projecte. Es va creure fermament en els coneixements de treball en equip i la visió més propera del món laboral que permetia assolir aquest tipus de competició eren molt positius per als alumnes de l'Escola. També es va creure en la possibilitat de posar en pràctica els coneixements assolits a classe, i per altra banda, la possibilitat d'obrir els camps d'investigació dins de l'ETSEIB que aquell moment no s'havien treballat.

A l'ETSEIB Motorsport, sempre s'ha apostat per anar més enllà de la simple competició. Des del principi s'ha optat per intentar dissenyar i construir el màxim nombre de peces possible i deixar l'obtenció d'elements amb la seva compra al mercat com a segona opció. D'aquesta manera s'aconsegueix un coneixement molt més ampli de cada element del monoplaça alhora que es redueixen els costos.

No va ser fins l'any 2011 quan es va decidir deixar enrere els motors de combustió i es va voler dissenyar el primer monoplaça elèctric. Des d'aleshores s'ha anat evolucionant cada part del vehicle i actualment s'ha dissenyat el CAT08e.

### **2.4. Característiques de la competició.**

La Formula Student es caracteritza per ser una competició d'enginyeria, on es valoren altres aspectes a més de tenir un bon monoplaça per competir.

Per començar, la puntuació global de la competició es divideix en dos tipus de proves diferents. Per una banda hi ha les proves estàtiques, on es valora el treball de l'equip en diversos vessants:

- *Design*: És la prova mare de les estàtiques, on jutges especialitzats en diversos sectors de l'automoció avaluen el disseny del monoplaça i es valoren que cada element que incorpora el vehicle estigui justificat i sigui el més adient.
- *Business Plan*: Uns representants de l'equip han de realitzar una presentació davant uns jutges amb un pla de negocis per tal de comercialitzar el monoplaça dissenyat.
- *Cost and Manufacturing Report*: Es tracta de la defensa dels costos de fabricació i tria del material de les peces que formen el monoplaça davant uns jutges.

Per altra banda també hi ha les proves dinàmiques, que són les proves on es demostra la competitivitat del vehicle dissenyat:

- *Acceleration*: Consta d'una acceleració de 75 metres, on el vehicle es troba parat a l'inici de la prova.
- *Skid Pad*: Es tracta d'una prova on el monoplaça ha de recórrer una pista en forma de vuit, com es pot observar a la *Figura 2.1*. D'aquesta manera s'aconsegueix avaluar el pas per corba dels diversos vehicles.

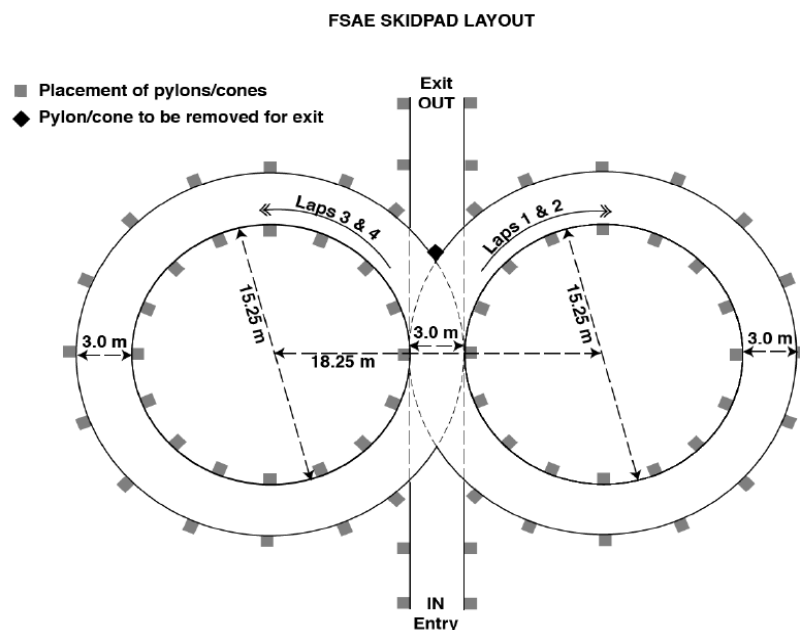


Figura 2.1 Dimensions de la prova de l'Skid Pad. [4]

- *Autocross*: És una prova contrarellotge, on els monoplaces han de realitzar una volta en circuit de *Formula Student* (típicament molt estrets, revirats i marcats amb cons) en el menor temps possible.
- *Endurance*: Es realitza en un circuit molt similar al de l'*Autocross*, però en aquest cas s'ha de recórrer un total de 22 quilòmetres.
- *Efficiency*: Al mateix temps de l'*Endurance*, es puntua també aquesta prova. S'avalua el consum d'energia durant el transcurs de la cursa de resistència.

La puntuació de les proves és la que es pot veure a la *Taula 2.1*:

<b>Prova</b>		<b>Puntuació</b>
Estàtiques	<i>Design</i>	150
	<i>Cost and Manufacturing Report</i>	100
	<i>Business Plan</i>	75
Dinàmiques	<i>Acceleration</i>	75
	<i>Skid Pad</i>	50
	<i>Autocross</i>	150
	<i>Endurance</i>	300
	<i>Efficiency</i>	100
<b>Total</b>		<b>1000</b>

Taula 2.1 Puntuació de la competició d'Alemanya. [4]

Com succeeix amb el *Design* dins les proves estàtiques, en el cas de les proves dinàmiques la prova més important és l'*Endurance*. La bateria del monoplaça es dimensiona per aquesta prova, de manera que l'energia emmagatzemada sigui suficient per poder-la finalitzar.

## 2.5. Origen del projecte.

El projecte neix amb la necessitat de canviar les bateries del monoplaça. L'any 2014, després de dues edicions desenvolupant un vehicle elèctric, les quals s'havia optat per una opció més conservadora escollint unes cel·les cilíndriques del tipus  $\text{LiFePO}_4$  (molt segures i robustes pel que fa a sobrecàrregues i sobredescàrregues però amb pitjors prestacions elèctriques), es decideix fer una inversió per millorar les cel·les. La intenció és aconseguir reduir el pes i volum de la bateria, a part d'augmentar l'energia fins a assolir l'objectiu marcat amb l'estudi energètic realitzat. A més del dimensionament de les cel·les, també s'ha hagut de triar i implementar una centraleta que monitoritzés tota la bateria. Per tal de poder-ho dur a terme, s'ha contactat amb les següents empreses: Melasta, fabricants de cel·les; Elithion i Freemans, fabricants de *Battery Management System*, per a disposar-ne d'un que s'aproximés a les necessitats de l'equip.

## 2.6. Motivació.

La gran evolució de les bateries en els darrers anys amb la importància que estan adquirint els vehicles elèctrics en el mercat ha fet que la tecnologia que incorporava el CAT06e estigués molt endarrerida respecte les prestacions que donaven les noves cel·les de liti.

La competició de *Formula Student*, que ajuda a formar els futurs enginyers, incorpora la millor tecnologia del mercat actual, de manera que els equips treballen per reduir el pes al màxim any rere any per tal de ser més competitius. Un dels elements més pesants d'aquests vehicles és la bateria i per tant es va plantejar la seva millora i com el gran objectiu del CAT07e. Tot això afectava a tota la resta de components que s'havien incorporat al monoplaça fins aleshores, que s'haurien de tornar a dissenyar.

També era decisiu l'impacte econòmic que suposava aquest canvi a l'equip, i per tant aquesta decisió havia de servir per diverses edicions del *Formula Student*.



## 3. Introducció.

### 3.1. Objectius del projecte.

Davant la necessitat de realitzar el canvi de les cel·les que s'havien incorporat fins al moment en les edicions anteriors a l'ETSEIB Motorsport, aquest projecte pretén fer una recerca de diferents tecnologies de cel·les al mercat, i realitzar un estudi per tal de trobar quines són les més adequades per a un monoplaça de FS, sabent que aquesta selecció servirà per als dos pròxims monoplaces. Un cop realitzada la tria de les cel·les, es procedeix a dissenyar la seva instal·lació al monoplaça CAT07e, a més de la seva evolució i adaptació al CAT08e. Per a fer aquesta adaptació al CAT08e, ha estat necessària una valoració dels resultats obtinguts i un estudi de possibles vies per seguir treballant per a millorar.

També pretén realitzar una recerca sobre diversos *Battery Management System*, o BMS, per tal de monitoritzar la bateria i saber el seu estat en cada instant. Alhora de fer la tria, s'han hagut de tenir en compte diverses propietats per tal de fer la millor selecció possible.

### 3.2. Abast del projecte.

Per tal d'assolir els objectius del projecte, s'ha contemplat la necessitat de realitzar i aprofundir en les següents etapes descrites:

CAT07e

- Recerca de models de cel·la al mercat: Per tal de seleccionar el model, és imprescindible conèixer les evolucions tecnològiques actuals.
- Tria de les cel·les segons l'estudi energètic realitzat: Amb les simulacions energètiques realitzades per altres membres de l'equip, s'ha partit d'una base per a saber quines eren les necessitats alhora d'escollir el model.
- Realització d'un programa que permeti facilitar la selecció: Per a poder facilitar la selecció i disseny de la nova bateria, s'ha elaborat un arxiu amb Excel per a poder comparar les prestacions de cada model.
- Verificació de les característiques elèctriques de les cel·les: Un cop triat el model, cal validar experimentalment les propietats de la nova bateria.

## CAT08e

- Millores a través de les conclusions de la primera edició amb les bateries seleccionades, tant amb BMS com amb les cel·les: després d'acabar la primera etapa amb el CAT07e, ha estat necessari valorar quins aspectes calia modificar de cara al nou disseny de monoplaça.
- Adaptació de les cel·les al nou tren de potència: Partint de la tria al monoplaça anterior, s'ha adaptat el model de cel·la al nou tren de potència considerant les noves limitacions i prestacions.
- Recerca de diversos tipus de BMS i selecció del més adient: Com amb la tria de la bateria, el coneixement profund dels tipus d'aquest tipus de producte és necessari per a realitzar una bona tria.
- Adaptació del carregador a la nova bateria: Amb tots els canvis realitzats a la bateria en quant a característiques elèctriques, s'ha contemplat la necessitat de realitzar diversos canvis en el carregador de l'equip.



## 4. Tria de les cel·les.

Per tal de realitzar una selecció del model de cel·la més adient per a un vehicle de FS, s'ha hagut de fer un estudi de l'energia necessària que ha de contenir la bateria completa i conèixer la tecnologia actual del mercat.

Un factor a tenir en compte també són les característiques ideals que han de tenir les cel·les per a un vehicle elèctric per a la competició de FS.

El factor clau per a seleccionar la cel·la és la densitat d'energia. Al tractar-se d'un monoplaça de competició, s'ha d'intentar minimitzar el pes de la bateria. A la *Taula 4.1*, que es troba a continuació, es pot observar que la bateria pesa gairebé una quarta part del vehicle:

<b>Concepte</b>	<b>Pes</b>
Bateria	50 kg
Total del vehicle	215 kg

Taula 4.1 Distribució dels pesos previstos del CAT08e.

L'element més pesat del monoplaça és la bateria, per tant és un dels elements que més afecta al comportament dinàmic del vehicle, i per això s'ha d'intentar minimitzar.

La primera tria que s'ha de realitzar és el tipus de cel·la que es vol incorporar.

### 4.1. Tipus de cel·les.

Hi ha diversos tipus de cel·les, que difereixen entre ells tant per química com per forma. A continuació es troba la classificació dels tipus més importants de cada química i empaquetament:

#### 4.1.1. Tipus de química. [8]

##### 4.1.1.1. Bateries de Base – Plom - Àcid.

Les bateries de tecnologia plom-àcid han estat molt important durant els últims cent anys i encara són molt utilitzades en el camp de l'automoció i altres aplicacions. Són bateries de baix cost, àmpliament estudiades i capaces de subministrar una alta potència. No obstant, tenen grans desavantatges:

- Baixa densitat d'energia.
- Pes molt elevat.
- Rang de temperatures òptim de funcionament molt petit.
- La presència d'elements perillosos contra la seguretat dels ocupants (àcid sulfúric, emissions d'hidrogen, plom) fan que no sigui una tecnologia molt recomanable encara que en els últims anys aquests perills han disminuït.

##### 4.1.1.2. Bateries de Base – Níquel.

El Níquel és més lleuger que el plom i té millors propietats electroquímiques. Hi ha diferents variants en aquest tipus de cel·les, que es divideixen en quatre tipus de bateries: ferro, zinc, cadmi i MH (metall hidrur). El model més destacat és el de Ni-Cd, per la seva gran densitat d'energia (per sobre de 200 W/kg) i el de Ni-MH, que s'utilitzen en molts vehicles híbrid.

A més, les cel·les de tipus Ni-MH no contenen cadmi i per tant són molt menys contaminants (les bateries de cadmi estan prohibides per ús domèstic).

##### 4.1.1.3. Bateries de Base – Liti.

El liti és el metall més lleuger i presenta unes característiques electroquímiques molt favorables. Per exemple, permet un voltatge termodinàmic elevat, el qual deriva en una alta energia específica i una alta potència específica. Aquest tipus de bateria es divideix, principalment, en dues tecnologies: liti ió i liti polímer.

Aquestes tecnologies són considerades les més avançades del mercat actual ja que tenen una gran densitat d'energia, tenen poques pèrdues al llarg del temps i requereixen baix manteniment.

Tot i això, també s'ha de tenir en compte que precisen d'un circuit de protecció que limiti el corrent i el voltatge, ja que en cas contrari es degraden ràpidament.

#### 4.1.1.4. Comparativa.

Seguidament es troba la *Taula 4.2*, on s'ha realitzat una comparativa amb els diversos tipus de cel·les estudiades i les seves prestacions:

Especificacions	Plom-Àcid	NiCd	NiMH	Liti		
				Cobalt	Magnesi	Fosfat
Densitat d'energia (Wh/kg)	30 – 50	45- 80	60 -120	150 - 190	100 – 135	90 – 120
Cicles de vida (fins al 80% de la descàrrega)	200 - 300	1000	300 - 500	500 – 1000	500- 1000	1000 – 2000
Pèrdues (per mes)	5%	20%	30%	<10%		
Voltatge màxim per cel·la	2,40 V	3,0 V	3,0 V	4,20 V	4,20 V	3,60 V
Voltatge nominal per cel·la	2,00 V	1,20 V	1,20 V	3,60 V	3,80 V	3,30 V
Voltatge mínim per cel·la	1,75 V	1,00 V	1,00 V	2,50 – 3,00 V	2,50 – 3,00 V	2,80 V
Rang de temperatures en càrrega	De -20 fins 50°C	De 0 a 45°C	De 0 a 45°C	De 0 a 45°C		
Rang de temperatures en descàrrega	De -20 fins 50°C	De -20 fins 65°C	De -20 fins 65°C	De -20 fins 60°C		

<b>Manteniment</b>	3 – 6 mesos	30 – 60 dies	60 – 90 dies	No cal manteniment.		
<b>Pic de descàrrega (en C's)</b>	5 C	20 C	5 C	> 3 C	> 30 C	> 30 C
<b>Tolerància a la sobrecàrrega o sobredescàrrega.</b>	Alta	Moderada	Baixa	Baixa		

Taula 4.2 Característiques dels diferents tipus de químiques de cel·les. [5]

Aquestes dades són aproximades; cada fabricant de cel·les té les seves característiques pròpies, i hi ha molts tipus de models de cel·les de cada tipus de química, depenent de la resta d'additius.

A l'*Apartat 4.4.* es parlarà del model de cel·la escollit i de les seves característiques concretes.

#### 4.1.2. Tipus de geometria.

En general, hi ha pocs tipus d'empaquetaments de les cel·les. A més, cada tipus de volum sol estar associat a un tipus de química i per tant no és un factor important que es pugui triar a l'hora d'escollir un model de cel·la.

Tot i així, hi ha tres tipus destacats que afecten a l'empaquetament global i característiques físiques del conjunt total de la bateria:

- **Cilíndriques** (*Figura 4.1*): Aquest tipus de cel·la es caracteritza per ser molt segura, ja que la coberta cilíndrica dura aporta una resistència respecte desperfectes físics externs i aporta seguretat en cas de danys interns de la cel·la. El seus inconvenients són el seu pes i el seu factor d'empaquetament, que al ser cilíndric és força més complicat de dur a terme i ocupa força volum. Les cel·les utilitzades al CAT05e i CAT06e eren d'aquest tipus.



Figura 4.1 Cel·la cilíndrica, incorporada al CAT05e i CAT06e.

- **Prismàtiques** (Figura 4.2): En quant a propietats de seguretat, està al mateix nivell que les cel·les cilíndriques, ja que la coberta és dura també. També és equiparable el pes per cel·la. Tot i així, el factor d'empaquetament és molt millor, i això permet reduir el volum total de la bateria considerablement.



Figura 4.2 Cel·la prismàtica.

- **De tipus sobre** (conegudes com *pouch cells*, Figura 4.3): Aquestes cel·les es caracteritzen per tenir una cobertura aïllant formada per un compost de PE i PP de 0,02 mm de gruix, que és molt lleuger i permet minimitzar el pes de la cel·la. A més, la seva forma prismàtica també permet fer un empaquetament de la bateria molt versàtil, i minimitzar el seu volum. Aquest és el tipus de cel·la més emprat en competició, i molt utilitzat a la FS. Per contra, és fàcil que una cel·la pugui fer-se malbé, i és molt susceptible a sobrecàrregues o sobredescàrregues. Qualsevol desperfecte físic a l'embolcall provoca un dany irreparable, ja que la reacció química interna de la cel·la es veu afectada.



Figura 4.3. Cel·la de tipus sobre, incorporades al CAT07e i CAT08e.

## 4.2. Prestacions elèctriques.

Les següents característiques són les que determinen quin tipus de cel·la és la més adient per a la competició de FS.

- **Energia:** Els fabricants de cel·les generalment no et faciliten aquest paràmetre, i s'ha de calcular. La tensió de la cel·la en un procés de descàrrega és com la que es troba a la *Figura 4.4*. Per tant, per saber l'energia que té acumulada una cel·la carregada s'hauria de fer amb l'Equació 4.1.:

$$E = \int_0^t U(t) \cdot I \cdot dt \quad (\text{Equació 4.1.})$$

Tot i així, s'aplica la simplificació que es troba a l'Equació 4.2., ja que les dades facilitades per la majoria de fabricants són capacitat nominal i tensió nominal de cada cel·la. A l'apartat 4.5 de validació experimental del model triat es comprovarà que aquesta simplificació permet tenir una bona estimació del resultat.

$$E_{bateria} = C \cdot U_{nom\ bateria} \quad (\text{Equació 4.2.})$$

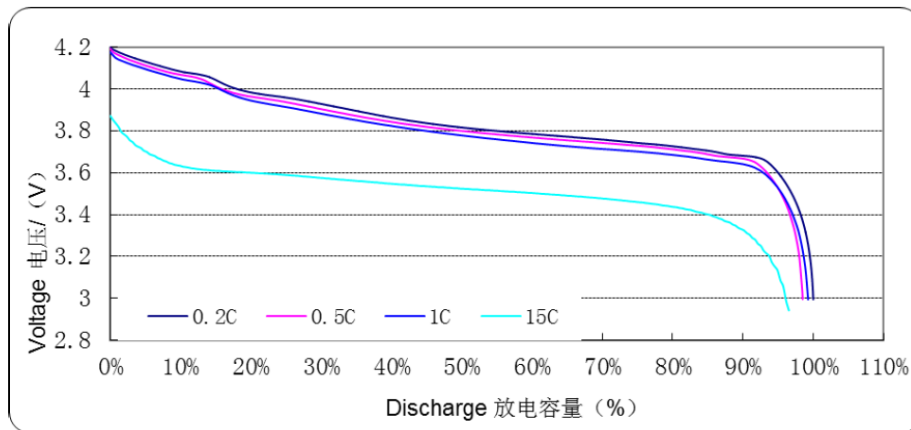


Figura 4.4 Gràfiques de descàrrega a diferents C's. [1]

- **Potència:** Les cel·les han de poder donar la potència requerida pel convertidor i motor en qualsevol moment. Això suposa que la capacitat màxima de descàrrega sigui suficient pel vehicle. Per a dimensionar la potència de la bateria s'estudia el cas extrem, és a dir, quan la bateria està totalment descarregada. En aquest instant, les cel·les han de poder subministrar els 80 kW que marca la normativa com a potència màxima sense malmetre's. La potència total de la bateria es calcula amb la Equació 4.3.:

$$P_{max} = I_{max} \cdot U_{nom \text{ bateria}} \quad (\text{Equació 4.3.})$$

La normativa de FS obliga al càlcul de l'energia i de potència amb la tensió màxima admissible per cel·la i no la tensió nominal per motius de seguretat. [4] És equivalent a aplicar un factor de seguretat alhora de dimensionar els elements de seguretat del circuit elèctric de potència del vehicle.

- **Densitat d'energia** (Wh/kg o Wh/m<sup>3</sup>): És una característica que s'ha d'intentar maximitzar per reduir al màxim possible el pes de la bateria i poder emmagatzemar l'energia necessària per acabar la prova d'Endurance. Generalment s'expressa en Wh/kg, però també es pot expressar en densitat volumètrica, i s'expressa en "Wh/m<sup>3</sup>".
- **Densitat de potència** (W/kg o W/m<sup>3</sup>): Com la densitat d'energia, és un factor que s'ha d'intentar maximitzar per tal de reduir el pes i volum de la bateria.

- **Intensitat de descàrrega màxima (A):** Com s'ha explicat anteriorment amb la potència, la intensitat de descàrrega màxima és la propietat que determina la possibilitat de poder donar la màxima potència del vehicle en tot moment de la prova. Tots els fabricants de cel·les donen aquesta dada en "C". Aquesta unitat representa la capacitat de la cel·la. Per exemple, una cel·la de 10 Ah de capacitat que pot descarregar-se a 10C, significa que la intensitat de descàrrega màxima és de 100 A.
- **Capacitat (Ah):** La capacitat és la característica que permet saber quina intensitat pot cedir la bateria durant un període de temps determinat. Un cop sabuda l'energia necessària per acabar l'*Endurance* i s'imposa la tensió de la bateria (generalment ve donada per la tensió màxima que suporta la bateria, per tal de minimitzar pèrdues per efecte Joule), la capacitat de la bateria queda determinada. Segons el fabricant de cel·les Melasta, les cel·les amb una capacitat superior a 10 Ah tenen un rendiment més baix que les cel·les de menys capacitat.

És aleshores quan té importància la distribució de cel·les a la bateria, ja que la capacitat total de la bateria pot estar formada per diverses cel·les en paral·lel. La capacitat de les cel·les connectades en paral·lel se suma. És per això que cal fer un estudi exhaustiu de totes les possibilitats amb molts models de cel·la, i determinar de quina manera podem obtenir el millor rendiment, obtenint unes prestacions excel·lents amb el volum i pes més baix.

- **Tensió (V):** Cada cel·la té un rang de tensions de treball determinat. Si aquest rang s'excedeix, tant per sota com per sobre, la cel·la queda danyada perdent eficiència, prestacions i fins i tot podent danyar tot el conjunt de la bateria. El *Battery Management System*, com s'explicarà a l'apartat 5, és l'encarregat que això no succeeixi. La unió en sèrie d'un conjunt de cel·les crea una tensió igual a la suma de les tensions de cadascuna de les cel·les. Per tant, sabent la tensió màxima que ha de tenir la bateria (com s'ha dit anteriorment, estarà determinada pel convertidor) es pot saber el nombre de cel·les necessàries connectades en sèrie, i el nombre de cel·les que haurà de controlar el BMS.

### 4.3. Necessitats i disseny elèctric de la bateria.

Per tal de poder escollir un model de cel·la, ha estat necessari el coneixement de l'energia consumida pel tren de potència que disposa el CAT07e a la prova de resistència de la competició de FS. S'ha partit del treball realitzat per l'Humbert Vidal, membre de l'equip, que va realitzar el Treball de Final de Grau de l' "Estudi i simulació del comportament



energètic del vehicle elèctric” [9], on va portar a terme la simulació del consum energètic a l'Endurance de Formula Student Germany de l'any 2012.

Es va aconseguir el perfil de velocitats ideal en cada punt i els radis de curvatura del circuit gràcies al programa Optimum Lap.

Les dades extrems de les simulacions i necessàries per a realitzar la selecció del model de cel·la més adient són les següents:

- Intensitat màxima de descàrrega: 175 A [9]
- Energia consumida: 5 kWh [9]

El tren de potència utilitzat consta de dos motors síncrons d'imants permanents Mavilor MA-55, un per a cada roda del tren posterior, i dos inversors dissenyats i construïts per un membre de l'equip en l'edició del CAT06e, descrits en el Projecte de Final de Carrera “Disseny, control i implementació d'un inversor trifàsic per un vehicle elèctric” [10]. Aquest tren de potència necessita una alimentació màxima de 600 Vdc per alimentar-se. Com s'ha dit anteriorment, per tal de minimitzar les pèrdues la tensió màxima de la bateria serà de 600 Vdc. Així, es pot saber el nombre de cel·les connectades en sèrie del total de la bateria:

$$N_{serie} = \frac{U_{maxbateria}}{U_{maxcel\cdot la}} = 142,83 \simeq 142 \text{ cel} \cdot les \quad (\text{Equació 4.4})$$

Disposant de les dades de la simulació i del càlcul del nombre de cel·les, cal aplicar un factor de seguretat, ja que es tracta d'una simulació, i per tant només s'ha pogut obtenir un resultat aproximat de la realitat. La intensitat que han de poder subministrar les cel·les, el cas extrem, seria amb una bateria completament descarregada (tensió mínima), i havent de subministrar els 85 kW màxims marcats per la normativa. En aquest cas:

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{N_{serie} \cdot U_{min\text{ cel}\cdot la}} = 199,53 \text{ A} \quad (\text{Equació 4.5})$$

Amb els valors obtinguts d'energia, i sabent la tensió nominal de la bateria, s'ha calculat la capacitat total òptima de la bateria amb l'Equació 4.6.:

$$C = \frac{E_{consumida}}{U_{nom\text{ bateria}}} = 9,51 \text{ Ah} \quad (\text{Equació 4.6})$$

Degut als possibles errors en el balanceig de les cel·les, i les pèrdues al llarg del circuit de potència, s'ha aplicat un coeficient de seguretat de 1,25 per tal d'assegurar l'èxit en la finalització de la prova de resistència.

- Valor arrodonit de la capacitat necessària de la bateria: 12 Ah

#### 4.4. Model de cel·la escollit.

Alhora de realitzar la tria del model de cel·la adequat, primer ha estat necessari fer un resum de les prestacions mínimes que ha d'acomplir. Són les que es poden trobar a la següent *Taula 4.3.*:

Propietat	Valor necessari
Capacitat nominal	12 Ah
Energia total de la bateria	6250 Wh
Intensitat màxima de descàrrega	200 A

Taula 4.3 Necessitats de la bateria de CAT07e.

Un cop sabudes aquestes prestacions mínimes, s'ha realitzat una recerca de models de cel·la de les següents marques: Kokam, EPS, Melasta, LG, A123, YOG Energy i Sinopoly.

Comparant les respectives densitats d'energia, la marca Melasta destaca per sobre la resta, a més de disposar de molts més models de cel·la que la resta. Un factor també a destacar per escollir aquest fabricant, és la seva presència a la competició amb altres equips i la seva disposició a col·laborar amb l'equip realitzant un descompte del 10% al preu de les cel·les.

El següent pas ha estat la realització d'un Excel per tal de poder comparar el model de cel·la més adequat. Aquest document consta d'una base de dades amb tots els models de Melasta i les seves propietats elèctriques i físiques. Com es pot veure a l'Apèndix A, a la part esquerra hi ha diversos paràmetres a determinar. Un cop fixats creen una llista amb els models més adequats, ordenats de menys a més segons el que pesaria el conjunt de la bateria amb aquestes condicions.

Els passos per a la realització del càlcul òptim de la distribució de la bateria han estat els següents:

1. Sabent la tensió màxima de la bateria, queda determinat el nombre de cel·les en sèrie connectades.
2. El nombre de paral·lels imposats dependrà del corrent màxim de descàrrega de cada model de cel·la. El que s'ha de garantir és que el màxim corrent de descàrrega de la bateria sigui més alt que el màxim corrent del circuit de potència, de manera que no es danyin les cel·les.
3. Un cop se sap quants paral·lels s'han imposat per model, es calcula l'energia que generaria aquesta distribució de cel·les i el seu pes. De totes les opcions, s'ha d'escollir la que més adequada. Aquesta serà la de menor pes de les opcions que emmagatzemen l'energia necessària per acabar la prova de resistència.
4. Per a no disposar d'una energia molt petita o massa gran, la capacitat nominal de la cel·la multiplicada pel nombre de paral·lels de la distribució de la bateria hauria de ser força semblant a la capacitat de la bateria imposada a la *Taula 4.3*.

El model escollit per al canvi de bateries del CAT07e és el SLPBA843126, amb les següents propietats de la *Taula 4.4*:

Capacitat nominal		6,35 Ah
Voltatge nominal		3,70 V
Càrrega	Corrent nominal màxim	12,70 A
	Corrent de pic	25,40 A (< 1 segon)
	Voltatge màxim	4,20 ± 0,03 V
Descàrrega	Corrent nominal màxim	95,25 A
	Corrent de pic	127,00 A
	Voltatge mínim	3,00 V
Resistència interna		$\leq 2,00 \cdot 10^{-3} \Omega$
Cicles de vida		$\geq 1000$

Rang de temperatures de treball	Càrrega	0 – 45 °C
	Descàrrega	-20 – 60 °C
Dimensions de la cel·la (Es pot veure a la <i>Figura 4.10.</i> )	Gruix (T)	10,50 ± 0,3 mm
	Amplada (W)	42,70 ± 0,5 mm
	Alçada (L)	127,50 ± 0,5 mm
	Distància entre borns	21,00 ± 1 mm
Dimensions dels borns de la cel·la	Amplada	15,00 mm
	Gruix	0,20 mm
	Alçada	25,00 mm
Pes		131,00 ± 2,00 g
Química		LiCoO <sub>2</sub>

---

Taula 4.4 Prestacions del model de cel·la escollit. [3]

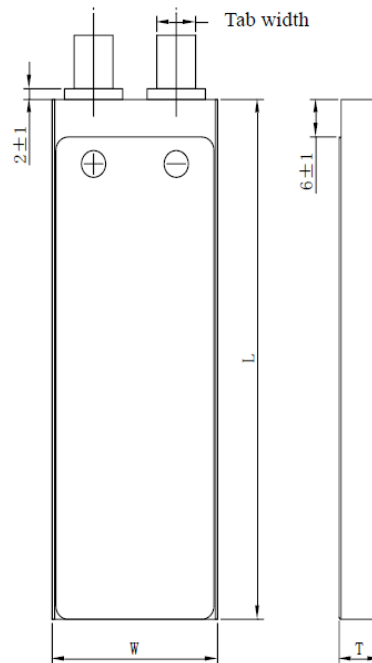
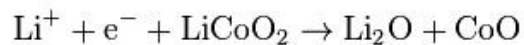


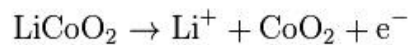
Figura 4.5 Dimensions de la cel·la. [3]

El fabricant, a més, va facilitar les reaccions químiques que es produeixen a l'interior de la cel·la:

- Reacció irreversible si es sobrepassen els límits de descàrrega (menys de 2,7 V):



- Reacció irreversible si es sobrepassen els límits de càrrega (més de 5,2 V):



Les prestacions del conjunt de la bateria amb la distribució de cel·les triada és la següent:

Distribució	142s2p
Nombre total de cel·les	284

Capacitat total		12,70 Ah
Energia		6672,58 Wh
Màxim corrent	Càrrega	25,4 A (nominal)
	Descàrrega	254 A (pic)
Tensió de la bateria	Màxima	596,40 V
	Nominal	525,40 V
	Mínima	426,00 V
Pes total		37204 ± 852 g

Taula 4.5. Prestacions i característiques de la bateria.



Figura 4.6 Model de cel·la escollit.

## 4.5. Validació experimental.

### 4.5.1. Metodologia i realització de les descàrregues.

Per tal de verificar que l'energia emmagatzemada per cada cel·la és la corresponent segons la seva fitxa tècnica, l'equip de Formula Student de la EUETIB va cedir les seves instal·lacions per poder fer la descàrrega de diverses cel·les a diferents intensitats i es va determinar experimentalment les prestacions energètiques d'aquest model de bateria.

Per tal de fer l'experiment, es va disposar de la següent càrrega electrònica:

- AGILENT (HP), model 6060B (*Figura 4.7.*)



Figura 4.7. Càrrega electrònica utilitzada per a les realitzacions de la descàrrega.

Aquest aparell va permetre realitzar descàrregues de fins a 55 A per cada cel·la, i comprovar l'efecte tèrmic a diversos corrents. Tot i així, es va prioritzar l'estudi elèctric i no tèrmic, ja que al tractar-se d'una descàrrega a corrent constant l'increment de temperatura és massa diferent de l'escalfament en condicions de descàrrega en cursa. Només s'han pogut obtenir conclusions tèrmiques pel que fa a rendiment elèctric, que es comentaran seguidament.

L'estudi es va fer amb aquests corrents i aquest temps per experiment de la *Taula 4.6.*:

Corrents de descàrrega (A)	Temps de l'experiment (s)
25 A	950 s
35 A	600 s
45 A	500 s

55 A	410 s
------	-------

Taula 4.6 Temps i corrent de cada experiment realitzat.

Com es pot veure a la *Figura 4.8.*, la connexió entre la cel·la i la càrrega electrònica es va fer de la mateixa manera com es realitza a la caixa de bateries que incorporarà el monoplaça, per intentar que les pèrdues per resistència de contacte fossin el més semblants possibles.

Es tracta de pressionar el born de la cel·la entre dues platines: la de la part de dalt d'un material conductor (en aquest cas alumini) i diferent per cada born, i una platina d'una material aïllant compartida pels dos borns. A la part de baix hi reposen els dos borns i es el suport pels dos cargols que pressionen la platina superior.



Figura 4.8 Realització d'una de les descàrregues realitzades.

A continuació es s'avaluarà cada experiment per separat i s'extrauran les seves pertinents conclusions.

Per verificar l'energia emmagatzemada, s'ha trobat una funció aproximada  $V(t)$  amb l'eina Microsoft Excel i s'ha realitzat el següent càlcul amb l'Equació 4.7.:

$$E = I \cdot \int_0^t U(t) \cdot dt \quad (\text{Equació 4.7})$$



1. Descàrrega a 25 A (Figura 4.9.).

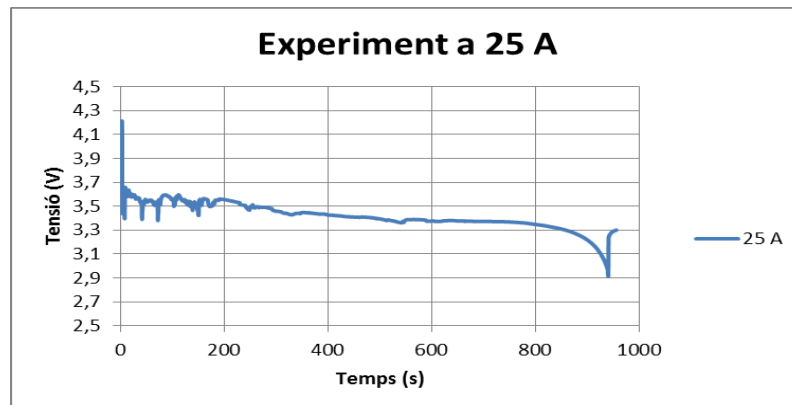


Figura 4.9 Descàrrega a 25 A.

Es pot comprovar que la tensió disminueix de la mateixa manera que en un model teòric de cel·la, però hi ha petites oscil·lacions.

La gran diferència que es pot observar respecte el model teòric és la caiguda de tensió inicial degut a la suma de resistències del sistema, compostes per:

- Resistència del cablejat de la càrrega electrònica.
- Resistència de les platines d'alumini.
- Resistència de contacte entre borns i platines.
- Resistència interna de la cel·la.

La resistència es pot calcular amb l'Equació 4.8.:

$$\Delta U = R_{total} \cdot I, \quad \text{on } R_{total} = \sum R \quad (\text{Equació 4.8.})$$

A partir dels 200 s de l'experiment, la tensió s'estabilitza més i deixa de tenir les següents oscil·lacions:

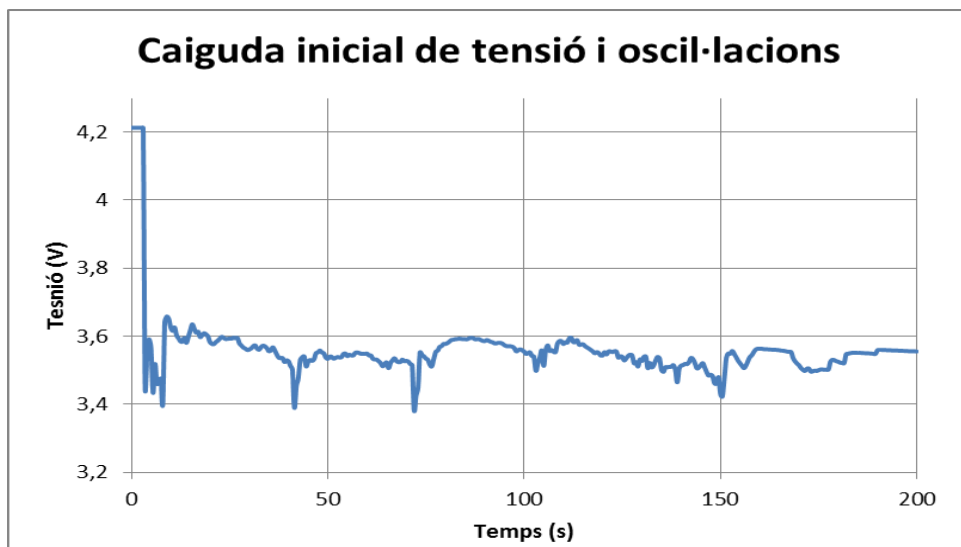


Figura 4.10. Ampliació de la descàrrega a 25 A.

El càlcul energètic realitzat en aquest experiment és el següent:

Valor de I	25 A
Valor de t	941 s
Energia emmagatzemada	$E = I \cdot \int_0^t U(t) \cdot dt = 22,44 \text{ Wh}$
Energia extrapolada a tota la bateria	$E = 22,44 \text{ Wh} \cdot 284 \text{ cel} \cdot \text{les} = 6372,96 \text{ Wh}$

Taula 4.7 Càlcul energètic per a la descàrrega a 25 A.

Aquests valors d'energia són inferiors als teòrics, però són molt similars als esperats, ja que només difereixen en 300 Wh aproximadament. Això suposa un error relatiu del 4,47%, calculat amb l'Equació 4.9.

$$\text{Error relat. (\%)} = \frac{\text{valor teòric} - \text{valor experimental}}{\text{valor teòric}} \cdot 100 \quad (\text{Equació 4.9.})$$

L'experiment també va enregistrar dades dels instants posteriors a la descàrrega, on es pot observar que la tensió torna a créixer. Aquesta recuperació de la tensió està directament relacionat amb la caiguda inicial de la tensió, ja que és degut a la resistència del sistema. A la *Figura 4.11*. es pot observar detalladament aquesta recuperació.

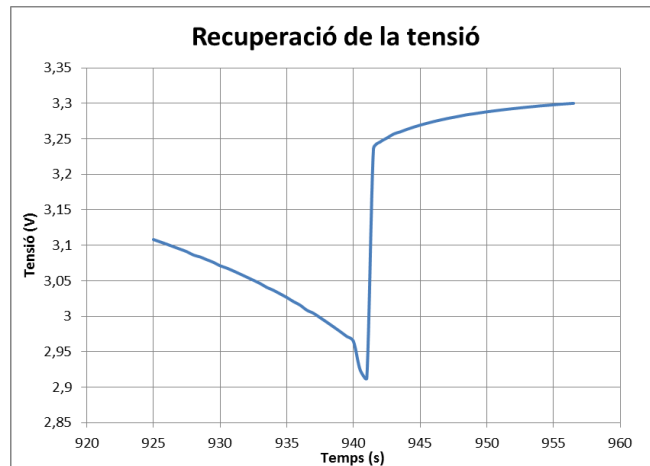


Figura 4.11 Detall de la recuperació de la tensió al acabar l'experiment.

## 2. Descàrrega a 35 A (*Figura 4.12.*).

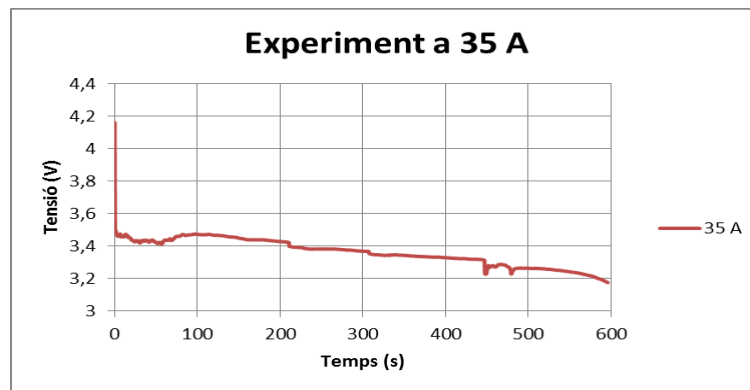


Figura 4.12 Descàrrega a 35 A.

Com en el cas anterior, a l'inici de la descàrrega hi ha una forta caiguda de la tensió degut a la resistència del sistema.

Com es pot observar a la *Figura 4.12.*, la descàrrega no té oscil·lacions tan pronunciades com en el cas dels 25 A, sinó que només es produeixen petits pics i esglaons en alguns instants de l'experiment.

El càlcul energètic realitzat en aquest experiment és el següent:

Valor de I	35 A
Valor de t	596 s
Energia emmagatzemada.	$E = I \cdot \int_0^t U(t) \cdot dt = 19,30 Wh$
Energia extrapolada.	$E = 19,30 Wh \cdot 284 cel \cdot les = 5481,2 Wh$

Taula 4.8 Càlcul energètic de la descàrrega a 35 A.

Com es pot observar a la *Taula 4.8.*, l'energia ha disminuït considerablement, degut a l'augment de pèrdues i la caiguda del rendiment. Tot i així, aquesta energia segueix essent suficient per acabar una *Endurance*. L'error relatiu, calculat amb l'*Equació 4.9.*, és del 17,8%. Cal recordar, però, que el rendiment tèrmic en descàrregues a intensitat constant afecten molt, i en condicions de cursa aquesta efecte queda reduït gràcies a la refrigeració que incorpora la caixa de bateries.

### 3. Descàrrega a 45 A (*Figura 4.13.*)

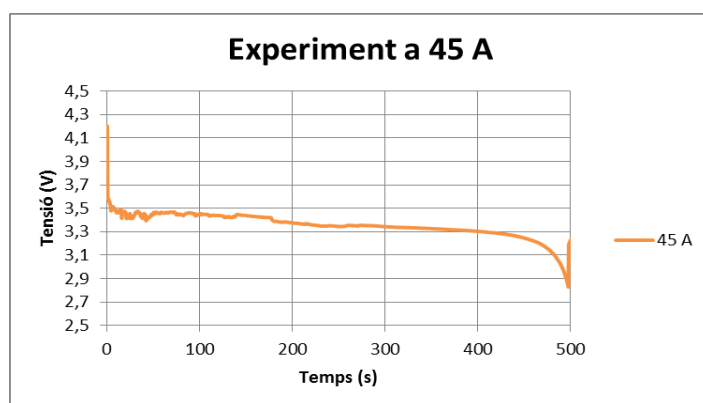


Figura 4.13 Descàrrega a 45 A.

En aquest cas també hi ha una gran caiguda de tensió inicialment. Després d'uns instants on es produeixen oscil·lacions de tensió, a partir dels 50 segons d'experiment la tensió s'estabilitza i es comporta com una descàrrega teòrica (sense pics, esglaons ni canvis bruscos).

Seguidament es troba l'estudi energètic de l'experiment a 45 A de descàrrega (*Taula 4.9*):

Valor de I	45 A
Valor de t	498 s
Energia emmagatzemada	$E = I \cdot \int_0^t U(t) \cdot dt = 18,81 Wh$
Energia extrapolada a tota la bateria	$E = 18,81 Wh \cdot 284 cel \cdot les = 5342,04 Wh$

Taula 4.9 Càlcul energètic de la descàrrega a 45 A.

Es pot comprovar que les pèrdues segueixen augmentant i que, consegüentment, l'error relatiu respecte l'energia emmagatzemada útil també augmenta. Tot i haver el mateix increment de corrent en l'experiment (10 A), l'augment de les pèrdues és molt menor. En aquest cas l'error relatiu és del 19,91%. L'augment de l'error ha estat del 2,11%, en comparació de la diferència entre 25 i 35 A, que és del 13,33%.

Aquest fet pot ser degut a moltes causes, però les deduïdes com a més probables són:

- El SOH de la cel·la emprada a l'experiment de 45 A és molt superior a la cel·la de l'experiment de 35 A. Això afecta directament al rendiment de la descàrrega.
- Mala connexió de la cel·la de 35 A amb la càrrega resistiva, de manera que les pèrdues han augmentat força. Al realitzar una extrapolació, el valor final de energia emmagatzemada útil es redueix respecte el valor real.

## 4. Descàrrega a 55 A (Figura 4.14).

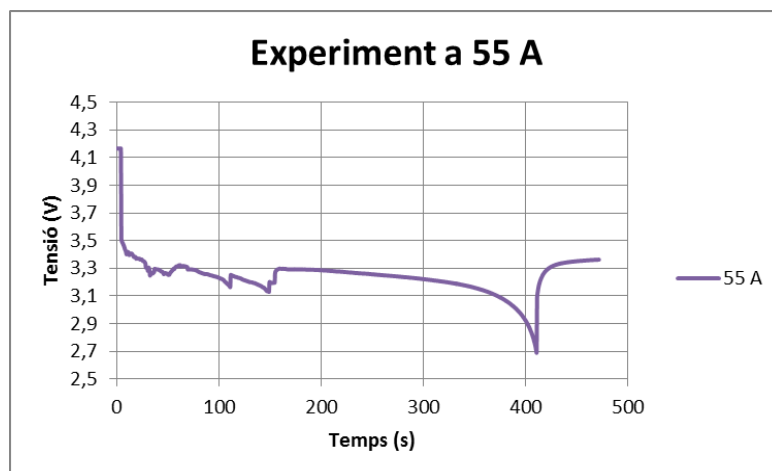


Figura 4.14 Descàrrega a 55 A.

En aquest es va realitzar un doble experiment simultaneament. Va ser degut al fort escalfament que es va produir tant en els borns de la cel·la com en el cos. Aquest fet va forçar a haver de refrigerar la cel·la a partir de l'instant 160 s. Es va situar un ventilador apuntant directament al lloc on es va realitzar l'experiment.

Com es pot observar a la *Figura 4.14.*, la tensió era molt inestable fins que es va començar a refrigerar la cel·la. La tensió s'estabilitza gairebé instantàneament i acaba essent una gràfica sense pics fins al final de la descàrrega. Això demostra la importància d'una bona refrigeració, que pot fer obtenir un rendiment i unes pretacions elèctriques molt superiors que en cas contrari.

El fet que la tensió no sigui estable pot afectar a l'alimentació de l'inversor del monoplaça. Pot afectar a la potència entregada pel motor o es poden donar casos d'alarma que facin aturar el vehicle.

Seguidament es troba l'estudi energètic realitzat amb la descàrrega a 55 A (*Taula 4.10.*):

Valor de I	55 A
Valor de t	411 s
Energia emmagatzemada	$E = I \cdot \int_0^t U(t) \cdot dt = 17,42 Wh$

Energia extrapolada a tota la bateria	$E = 17,42 \text{ Wh} \cdot 284 \text{ cel} \cdot \text{les} = 4947,28 \text{ Wh}$
---------------------------------------	--

Taula 4.10 Càlcul energètic de la descàrrega a 55 A.

Aquest valor d'energia útil ja no permetria acabar una cursa de resistència a màxima potència. Això obligaria a jugar amb els valors de rampa d'acceleració, parell i potència màxima per tal de reduir el consum. Tot i així, és un valor molt pròxim al valor energètic consumit obtingut per les simulacions.

#### 4.5.2. Observacions.

A continuació es pot observar a la *Figura 4.15* l'energia disponible en cada descàrrega realitzada. Es podria establir un patró lineal per poder saber l'energia per cada intensitat descarregada, però l'experiment de 35 A difereix força de la linealitat. Per saber si és un fet puntual o és per qüestions internes del comportament de la cel·la, s'hauria de repetir l'experiment. Tot i així, per manca de recursos i acreditant que l'energia emmagatzemada ja permetria acabar una *Endurance* amb una mitjana de 35 A, s'ha descartat aquesta opció.

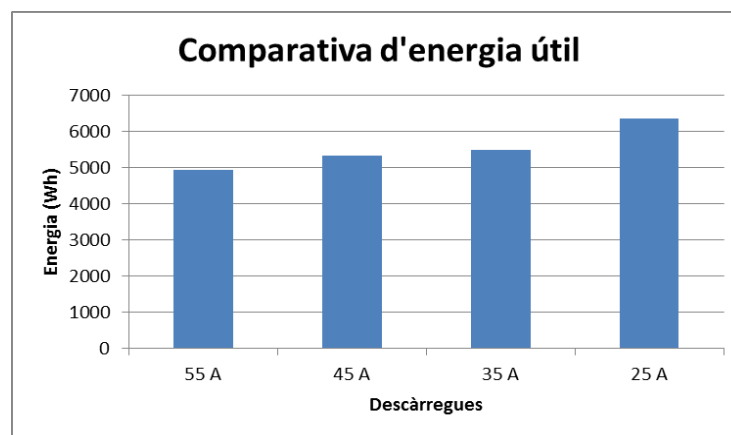


Figura 4.15 Energia emmagatzemada en cada experiment.

Per tal de saber quina serà l'energia aproximada disponible al monoplaça cal saber la mitjana de corrent en una cursa de resistència. Segons les simulacions realitzades, la mitjana real estaria entre 30 i 50 A, depenent del ritme que es vulgui implementar. Amb la configuració de les cel·les que disposa la bateria, el corrent per cel·la es divideix en 2

degut al paral·lel. Així, la descàrrega de les cel·les estaria entre 15 i 25 A. Pel que fa al temps que han durat els experiments, es pot verificar que els resultats de les simulacions són aproximats a la realitat. A la següent *Figura 4.16.*, es pot veure els temps totals a la *Endurance* de 2014. La mitjana total de temps està situada en 1593,17 segons.

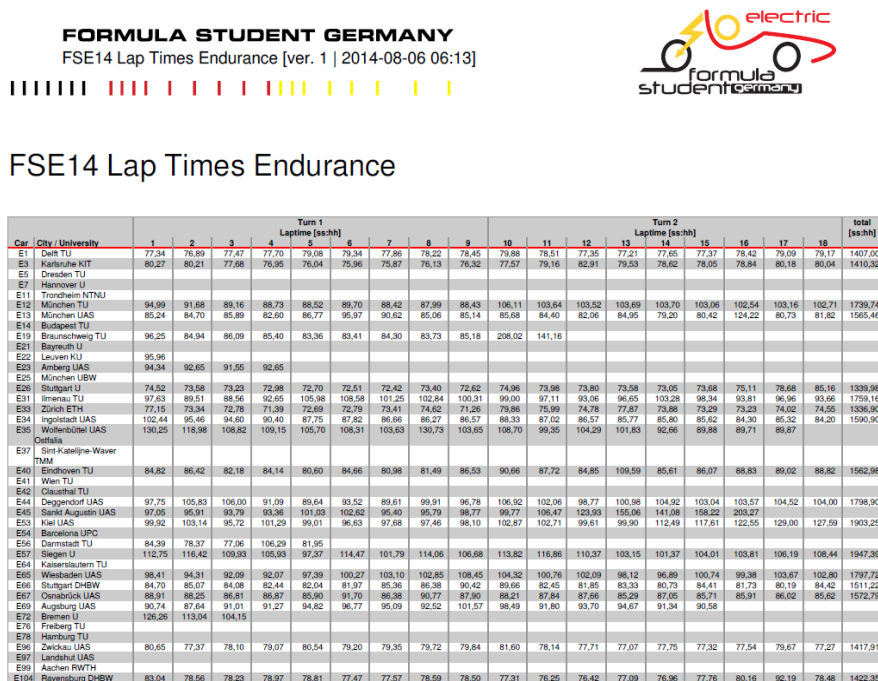


Figura 4.16 Temps per volta i totals de l'Endurance d'Alemanya l'any 2014. [6]

Amb la mitjana de 25 A de descàrrega, es disposaria de 1882 s de circulació. És a dir que disposaríem de suficient energia per acabar la prova de resistència.

## 4.6. Adaptació al CAT08e.

### 4.6.1. Canvis en el tren de potència.

En l'edició del CAT08e, s'ha decidit millorar la resta del tren de potència: els motors i els inversors. Tot i que els motors elèctrics van inventar-se abans que els motors de combustió interna, sempre s'han utilitzat per a maquinària i no com a sistema de tracció





d'un vehicle. En els darrers anys però, amb l'aparició de les motocicletes elèctriques i cotxes híbrids i elèctrics, les prestacions dels motors elèctrics en quant a parell a altes revolucions sense que el debilitament de camp afecti gaire ha millorat força. Han començat a aparèixer motors destinats a l'automoció, de manera que s'ha reduït considerablement el seu pes.

Després de tres edicions, on els motors que propulsaven els monoplaces eren dos Mavilor MA-55 (destinats en general a maquinària industrial), s'ha pres la decisió d'incorporar el motor EMRAX 228 HV, de la marca Enstroj (*Figura 4.17.*).

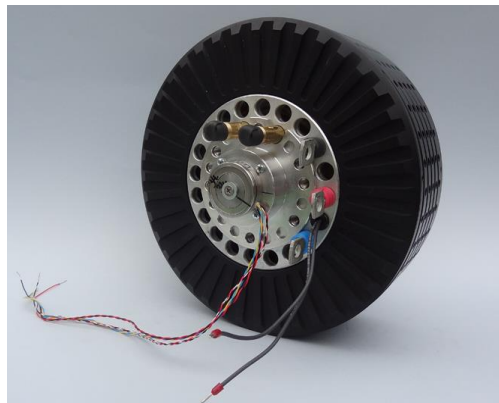


Figura 4.17 Motor Emrax 228 HV.

Les prestacions més interessants d'aquest motor són la seva corba de parell (la trobem a la *Figura 4.23.*), la seva potència i sobretot el pes, que apareixen a la següent *Taula 4.11.*

Potència nominal	40 kW
Potència màxima	100 kW
Parell màxim	240 Nm
Pes	12,5 kg
Revolucions màximes	5000 rpm

Taula 4.11 Característiques del motor Emrax 228 HV. [12]

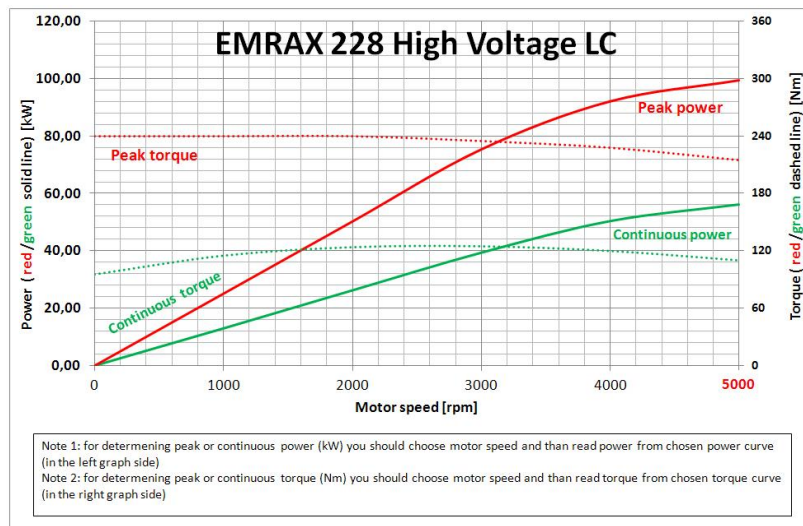


Figura 4.18 Corba de parell del motor Emrax 228 HV. [12]

**Torque/Speed Curve**

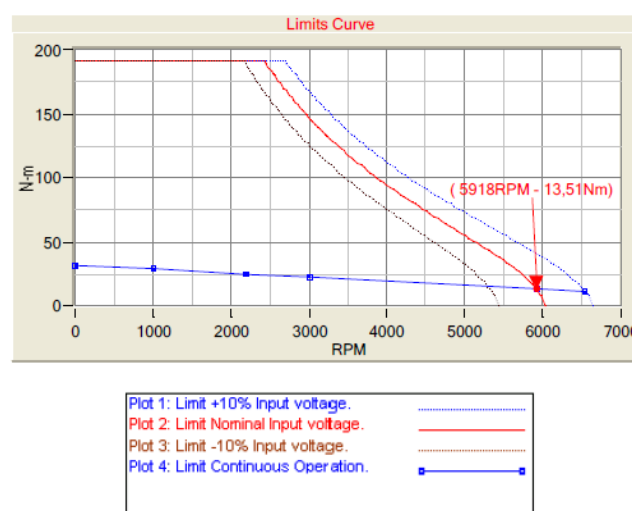


Figura 4.19 Corba de parell del motor Mavilor MA-55. [13]

Si es comparen les corbes de parell (*Figures 4.18. i 4.19.*) dels dos motors s'observa com el parell es manté molt més elevat a altes revolucions en el motor EMRAX 228 HV que en el Mavilor MA-55. En aquest últim model, el debilitament de camp comença a afectar a partir de les 2500 rev/min, i el parell es redueix considerablement.

El parell màxim disponible amb el motor EMRAX és de 240 Nm. En el cas dels motors Mavilor MA-55 i el inversor desenvolupat a l'equip, el parell màxim és de 100 Nm per motor.

El fet de disposar de molt parell a altes voltes permet disposar de molta acceleració quan el vehicle ja es mou a certa velocitat. En un vehicle de competició, aquesta característica és vital per millorar els temps per volta.

El controlador associat a aquest motor és el BAMOCAR D3 400-400 RS de Unitek, amb una potència nominal de 80 kW i una potència màxima de 160 kW (*Figura 4.20.*).



Figura 4.20 Inversor BAMOCAR D3 400-400 RS.

A més, amb aquest canvi de tren de potència s'ha aconseguit una reducció de pes de 31 kg en el vehicle. El canvi ha estat passar de dos motors i dos convertidors a l'eix posterior del vehicle (un motor per a cada roda) a un inversor, un motor i un diferencial a l'eix posterior.

A la *Figura 4.21.* es pot observar la distribució del tren de potència al monoplaça en l'edició de CAT07e. Les bateries dividides en dues caixes independents situades a ambdós laterals, i els inversors i els motors situats a l'esquena del pilot. En canvi, a la *Figura 4.22.* s'observa que amb el canvi a un únic inversor i un motor ha generat suficient espai a la part posterior per a situar-hi les bateries en una única caixa.

A les *Figures 4.21.* i *4.22.* es troben les bateries marcades en rectangles vermells, els convertidors en rectangles verds i els motors estan emmarcats en groc.

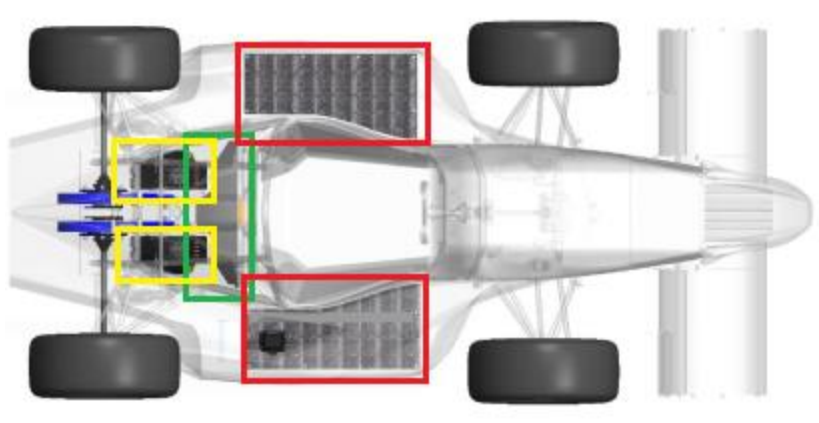


Figura 4.21 Planta del CAT07e.

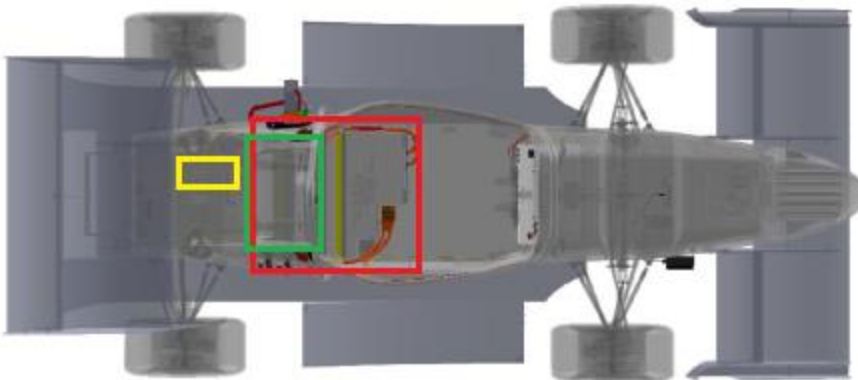


Figura 4.22 Planta del CAT08e.

També ha permès generar prou espai per a poder incorporar la bateria a la part posterior del vehicle. En l'edició del CAT07e, les bateries estaven dividides en dues caixes separades, incorporades a ambdós costats del monoplaça. Això dificulta el cablejat de potència i la càrrega fora del vehicle. També afecta al nombre de components de seguretat i connectors que s'han d'incorporar. Definitivament, un únic paquet de bateries simplifica molt la instal·lació del tren de potència en el monoplaça.

#### 4.6.2. Reestructuració de la bateria.

Per a poder utilitzar la bateria adquirida per a l'edició de CAT07e, s'ha hagut de dissenyar una nova distribució de les cel·les degut al canvi de tren de potència. És per això que un

membre de l'equip, en Víctor Calvo, ha dissenyat un model del CAT08e amb Simulink per tal de verificar quina seria l'energia consumida en una *Endurance* amb el nou motor i inversor. El model es pot trobar al Treball de Final de Grau: "Caracterització i simulació d'un vehicle de competició elèctric de la Formula Student".

Els resultats obtinguts de les noves simulacions són:

- Intensitat màxima de descàrrega: 173 A
- Energia necessària: 6035 Wh

Un cop sabut el consum d'aquest nou tren de potència, cal mirar les restriccions de tensió i corrents màxims de l'inversor, i elaborar la distribució de cel·les òptima. S'ha d'avaluar si és viable adaptar les cel·les que es van adquirir l'any anterior de manera que es pugui garantir bones prestacions elèctriques i mecàniques.

El BAMOCAR D3 400-400 RS admet una tensió màxima de 400 Vdc de bateries i un corrent de descàrrega màxim de 250 A. Per tant, hi ha un canvi important en les restriccions.

Seguint el mateix procediment per obtenir la configuració més adequada explicada a l'Apartat 4.4., s'aplica al model de cel·la escollit per al CAT07e. Els resultats de la configuració òptima són els següent:

Distribució	95s3p	
Nombre total de cel·les	285	
Capacitat total	19,05 Ah	
Energia	6696,075 Wh	
Màxim corrent	Càrrega	38,1 A (nominal)
	Descàrrega	381 A (pic)
Tensió de la bateria	Màxima	399,0 V
	Nominal	351,5 V
	Mínima	285 V

Pes total	37335 ± 855 g
-----------	---------------

Taula 4.12 Característiques de la bateria de CAT08e.

Queda palès que les característiques físiques (com el pes i el nombre de cel·les) no ha variat gairebé. Això implica que l'energia total emmagatzemada tampoc. Tot i així, sí que ha variat la tensió total de la bateria, reduint-se els màxims de 600 Vdc a 400 Vdc, així com la tensió nominal i mínima. El connexionat físic de la bateria també difereix força, ja que s'han reduït el nombre de cel·les connectades en sèrie de 142 a 95, i en canvi ha augmentat el paral·lel.

Aquesta implicació en la connexió de les cel·les afecta també al BMS, ja que només cal monitoritzar totes les que estan connectades en sèrie. Elèctricament, una connexió en paral·lel de diverses cel·les equival a una sola cel·la però de més capacitat. Així, s'aconsegueix simplificar la instal·lació del BMS, reduint-ne la quantitat de cablejat i el nombre de PCBs necessàries.

Un altre canvi que s'ha incorporat en l'edició del CAT08e, en conseqüència de l'augment del corrent màxim, que ha passat de 200 A a 250 A, ha estat la realització d'un bany d'or a les connexions de coure de la bateria. La connexió realitzada és una evolució de la implementada en l'edició anterior, feta mitjançant la pressió d'una platina conductora sobre el born de la cel·la.

El bany d'or permet reduir la resistència de contacte entre born i platina, a més de millorar la capacitat de refrigeració de la bateria i obtenir un increment de l'eficiència.

#### Realització del recobriment d'or

La raó principal per fer aquest recobriment és la protecció del coure. El coure és un metall que s'oxida al cap del temps i perd la conductivitat a la superfície. Amb el disseny realitzat per a les connexions, la conductivitat superficial és un factor clau que determina el rendiment de la bateria. Per tal d'evitar aquest problema, és necessari recobrir la xapa de coure amb un metall que no reaccioni amb l'aire després d'un cert temps.

Gràcies a la col·laboració amb l'empresa MGS RESPOSTA, es va tenir l'opció de millorar les prestacions de les connexions realitzant un recobriment d'or.

Abans de poder aplicar el recobriment d'or, però, es va haver d'aplicar un recobriment de Níquel de 0,005 mm de gruix per tal que actués de barrera de difusió entre l'or i el coure.

Sense aquest níquelat inicial, l'or monovalent perd propietats conductores i de protecció antioxidant quan s'aplica el recobriment, i aleshores no s'assoliria la millora de les connexions desitjada. Això és degut a que aquests dos materials tenen un coeficient de difusió molt elevat.

#### Procediment aplicat al Níquelat.

1. Bany amb un desengreixant electrolític.
2. Bany amb aigua (normal).
3. Bany en un activat àcid (contingut del 5% d'àcid sulfúric.)
4. Bany amb aigua (normal).
5. Bany amb aigua desmineralitzada.
6. Aplicació del Níquelat per via electrolítica.

#### Característiques del bany:

- $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (250 g/l)
- $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (40 g/l)
- $\text{H}_3\text{BO}_3$  (40 g/l)
- Abrillantadors comercials (0,02 l/l de solució)
- Temperatura: 60 °C
- Densitat de corrent (J): de 200 a 400 A/m<sup>2</sup>

7. Rentat amb aigua i posterior assecat.

#### Procediment aplicat al recobriment d'or.

El bany d'or aplicat té una concentració del 92% en Or i un 8% de Níquel i un gruix de 0,001 mm. Això permet obtenir les següents prestacions:

- L'or millora la protecció contra l'oxidació. La conductivitat de l'or en una superfície permet reduir la resistència de contacte. Amb aquest recobriment de tota la platina conductora també millorem l'efecte Skin, o efecte pel·licular. Aquest efecte descriu la tendència del corrent altern a circular per la superfície del conductor. Tot i tractar-se de corrent contínua a la bateria, no es tracta d'un corrent constant, sinó

que la descàrrega és un conjunt de pics de intensitat. Això fa que aquest efecte també intervingui en aquest cas.

- L'or i el coure són materials molt tous. El Níquel millora la duresa superficial de les peces. També s'aconsegueix més brillantor i es disminueix el coeficient de fricció.

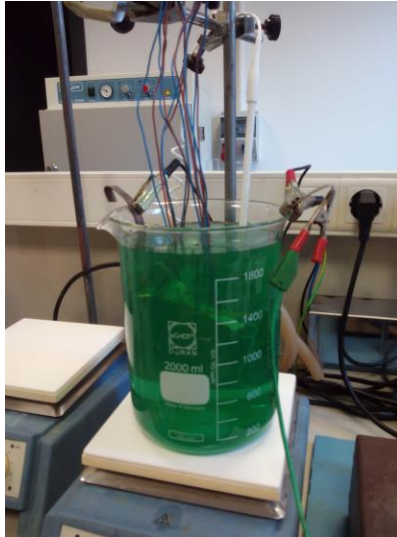


Figura 4.23 Bany de deposició de les partícules d'or.

De la mateixa manera que amb el niquelat, el procediment del recobriment és el següent:

1. Bany amb un desengreixant electrolític.
2. Bany amb aigua (normal).
3. Bany en un activat àcid (contingut del 5% d'àcid sulfúric.)
4. Bany amb aigua (normal).
5. Bany amb aigua desmineralitzada.
6. Aplicació del recobriment d'or per via electrolítica.

Característiques del bany:

- $K[Au(CN)_2]$  (4 g/l, conté el 68,3% d'or en estat monovalent)
- Níquel en forma d'un complex adequat.
- Es tracta d'un electrolit de caràcter àcid pH = 3,5.



- Temperatura: 30 °C
- Densitat de corrent (J): 100 A/m<sup>2</sup>

7. Rentat amb aigua i posterior assecat.



Figura 4.24 Realització del xapat d'or.



## 5. BMS

### 5.1. Introducció

El *Battery Management System*, o més conegut com a BMS, és la centraleta que monitoritza totes les cel·les que componen la bateria individualment. És l'element indispensable per tal de treure el màxim rendiment de la bateria, a més de protegir-la de sobrecàrrega i sobredescàrrega i permet allargar la seva vida útil.

La normativa de *Formula Student* obliga a incorporar aquest element segons la norma E.V. 3.6., i és vital per a les bateries formades per més d'una cel·la [4]. Hi ha diferents tipus de BMS, que s'explicaran posteriorment, però la funció principal és controlar la tensió de cadascuna de les cel·les i intentar que aquestes tensions estiguin el més pròxim possible les unes de les altres. Amb altres paraules, que la diferència de tensió entre la cel·la més carregada i la més descarregada sigui el més petit possible. D'aquesta manera s'aconsegueix extreure la màxima energia possible de la bateria. Aquesta diferència de tensions varia amb cada càrrega i cada descàrrega degut a la química de cada cel·la, que fa que qualsevol petita diferència en la composició faci variar el temps de càrrega i l'energia emmagatzemada. Així, unes cel·les descarreguen més ràpid que d'altres, igual que passa durant el procés de càrrega.

Per tal d'obtenir una bona càrrega, s'ha de realitzar un procés iteratiu entre l'anivellament de tensions i la introducció d'energia a les cel·les a través del carregador.

### 5.2. Característiques bàsiques

El BMS que ha d'incorporar l'equip ha d'encarregar-se de quatre funcions bàsiques:

#### 5.2.1. Control de la tensió i la temperatura de les cel·les.

En el cas de la tensió, ha d'estar monitoritzada en la totalitat de les cel·les de forma individual, controlant que cap d'aquestes sobrepassi els límits inferiors i superiors de tensió que permet la cel·la. Pel que fa la temperatura, és important que estigui ben controlada per tal d'assegurar el bon estat de les bateries, que també té una zona de treball amb un límit superior i inferior. La temperatura també marcarà el rendiment de la bateria i l'energia que aquesta pugui subministrar. Tot i així, la normativa de *Formula*

*Student* diu, en l'article 3.6.6., que només cal controlar un mínim del 30% de les cel·les.[4] Tot i així, aquests sensors han d'estar col·locats als punts més crítics de la caixa de la bateria. Aquests punts es poden saber de dues maneres: Fent simulacions o mesurant experimentalment la temperatura realitzant cicles de descàrrega, que després s'hauran de justificar per tal de poder prendre part a les diferents competicions.

### 5.2.2. Càlcul del *State of Charge*. [11]

El càlcul del *State of Charge* o SOC és, a dia d'avui, un algoritme en contínua evolució. Es tracta del càlcul que permet saber el percentatge de càrrega de la bateria. És a dir, permet conèixer quin és l'estat de l'energia que resta a les cel·les en tot moment i poder reaccionar conseqüentment en cada cas. És una altra manera de saber si la bateria està esgotada o encara es pot disposar d'ella sense necessitar coneixements elèctrics. Hi ha diverses maneres de calcular-ho, tot i que no és un càlcul exacte, sinó una aproximació.

- *Coulomb counting – current based* ( $SOC_c$ ): està basat en el càlcul de intensitat consumida respecte el total de capacitat que té la cel·la. Per tal de poder realitzar aquest càlcul, és necessari disposar de memòria en el dispositiu, per tal d'integrar la intensitat consumida en cada instant respecte el temps de descàrrega. Aquesta és l'expressió de l'estimació de Coulomb:

$$SOC_c(t) = SOC_c(0) - \frac{1}{C} \cdot \int_0^t I(t) \cdot dt \quad (\text{Equació 5.1.})$$

- *Voltage based* ( $SOC_v$ ): aquest SOC està basat en el terme anomenat *Open Circuit Voltage* (OCV), ja que té una relació bijectiva. Els paràmetres "a" i "b" es troben amb les mesures experimentals de la descàrrega d'una cel·la.

$$OCV(t) = a \cdot SOC_v(t) + b \quad (\text{Equació 5.2.})$$

$$OCV(t) = U(t) - I(t) \cdot R_{total} \quad (\text{Equació 5.3.})$$

- Kalman

Un dels models per a obtenir una bona estimació del SOC és la combinació de l'algoritme de *Current based* i el *Voltage based*.

D'aquesta manera, l'algoritme seria el següent:

$$SOC = \alpha \cdot SOC_c + (1 - \alpha) \cdot SOC_v \quad (\text{Equació 5.4.})$$

Per tal de trobar l'algoritme, el primer pas és intentar trobar el model de la càrrega i descàrrega de la cel·la que més s'hi approximi. És a dir, l'algoritme variarà per a cada model de cel·la.

Tot i així, hi ha mètodes més senzills, i també més emprats, per al càlcul del SOC. Un d'ells, per exemple, és el següent:

$$SOC(t) = \frac{C - \int_0^t I(t) \cdot dt}{C} \quad (\text{Equació 5.5.})$$

### 5.2.3. Balanceig de les cel·les.

El BMS s'encarrega d'igualar les tensions de totes les cel·les mitjançant un procés anomenat balanceig. N'hi ha de dos tipus:

#### 5.2.3.1. Balanceig Actiu.

El balanceig actiu és un procediment que consisteix en anivellar el nivell de les cel·les traspasant energia de les cel·les més carregades a les més descarregades. Permet treure el màxim rendiment de la bateria, ja que totes les cel·les estan al mateix nivell de tensió en tot moment.

Explicat en més detall, es parteix d'una bateria totalment carregada, amb totes les cel·les a la mateixa tensió, a 4,2 V. Comença la descàrrega de la bateria i en un moment donat, una cel·la, degut a diferències en la reacció química o degut a diferent SOH, comença a descarregar-se més ràpid que la resta. Si no actués el balanceig actiu, la bateria quedaria esgotada quan aquesta cel·la arribés al límit inferior de descàrrega, 3 V. La resta de cel·les, en canvi, encara tindrien energia emmagatzemada que no es podria consumir.

En el cas que la bateria disposés d'un BMS amb sistema actiu de balanceig, la bateria hauria arribat al final de la descàrrega amb totes les cel·les a nivell mínim de tensió, és a dir cada cel·la continguda en el paquet estaria a 3 V i s'hauria extret tota l'energia.

El mateix passa durant el procés de càrrega. Hi ha cel·les que es carreguen més ràpid que d'altres. Quan la cel·la més carregada arriba a 4,2 V, s'ha de deixar de carregar la bateria. En canvi, si es disposa del sistema de balanceig actiu, totes les cel·les van augmentant la tensió de la mateixa manera. Al finalitzar el procés de càrrega, totes les cel·les estaran a la tensió màxima. El corrent de balanceig màxim és generalment 3 A, dependent de les prestacions de cada BMS.

La majoria de bateries que incorporen els vehicles que hi ha al mercat actual no incorporen aquest sistema. Això es produeix degut a l'electrònica i cablejat necessari alhora de instal·lar-lo. Cada cel·la ha d'estar interconnectada amb tota la resta, de manera que sigui possible traspasar energia d'una cel·la a tota la resta. Per tant, aquest sistema es complica a mesura que augmenta el nombre de cel·les de la bateria. També s'ha de tenir en compte el factor de intensitats màximes que admet el sistema de balanceig actiu del BMS. Depenen del corrent de descàrrega de la bateria, es pot donar el cas que el BMS no estigui prou capacitat per cedir l'energia entre les cel·les prou ràpid per a que totes estiguin anivellades.

Tot i així, aquest sistema permet optimitzar l'energia emmagatzemada per la bateria molt millor que el sistema de balanceig passiu.

### **5.2.3.2. Balanceig Passiu.**

Un sistema molt més comú és el balanceig passiu. Aquest sistema s'encarrega d'anivellar les tensions de cada cel·la a través d'una resistència que incorpora cada PCB del BMS i un díode que deixa circular corrent quan la cel·la està per sobre de la tensió assignada com a límit de balanceig. Cada cel·la té associada una resistència, de manera que circulen mil·liampers quan el BMS ho sol·licita. D'aquesta manera l'anivellament de tensions no permet aprofitar tota l'energia de les cel·les, sinó que permet anivellar les tensions cremant l'energia de les cel·les més carregades.

És un procediment iteratiu que se sol utilitzar durant els processos de càrrega. Partint d'una bateria descarregada, es procedeix a carregar a CC/CV. Igual que en l'exemple de descàrrega en el balanceig actiu, hi haurà cel·les que es carregaran més ràpid que d'altres. Quan la primera cel·la més carregada arriba a 4,2 V, s'ha d'aturar el procés de càrrega. Aleshores es procedeix a consumir l'energia de les cel·les més carregades fins que estan a la mateixa tensió que la més descarregada. Equival a reduir la diferència de tensions que hi ha entre les cel·les fins que estan totes a la mateixa tensió. Una vegada estan a la mateixa tensió, es torna a procedir a seguir amb el procés de càrrega, i es va repetint el procés fins que totes les cel·les estan del tot carregades.

Per a les bateries de gran capacitat, com les que incorporen els automòbils, aquest tipus de balanceig és lent degut a les limitacions de les resistències del BMS. Generalment permeten consumir entre 100 mA i 200 mA, i això comporta moltes hores per tal d'anivellar les tensions de cada cel·la. El balanceig passiu també es pot anar realitzant paral·lelament durant el procés de càrrega, de manera que es disminueix el temps d'anivellament de cel·les.

És un sistema més utilitzat que el balanceig passiu degut a la facilitat de instal·lació i l'electrònica més senzilla, que fa que el BMS sigui més econòmic.

### 5.2.3.3. Comparativa de hardware i software entre el balanceig actiu i el balanceig passiu.

Com s'ha comentat als dos apartats anteriors, el hardware del sistema de balanceig actiu és molt més complicat que el sistema de balanceig passiu. En les següents *Figures 5.1.* i *5.2.* es pretén exemplificar com seria el cablejat de manera molt simplificada:

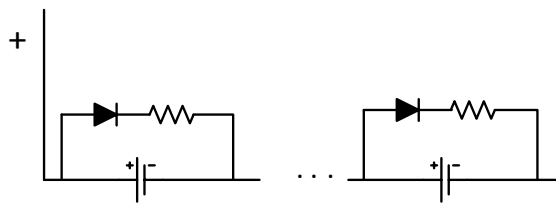


Figura 5.1 Schematic simplificat de balanceig passiu.

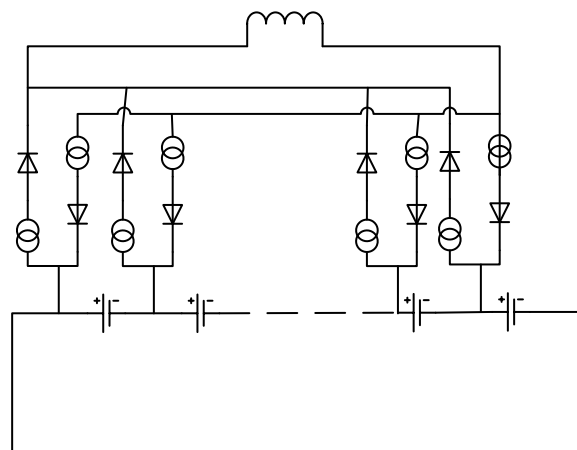


Figura 5.2 Schematic simplificat de balanceig actiu.

Veient la diferència de components entre una instal·lació i l'altra ja es pot veure la diferència de cost i complicació que pot suposar el balanceig actiu respecte el balanceig passiu.

En el sistema de balanceig actiu, a més, són necessaris tants convertidors DC-DC com cel·les disposa la bateria, ja que ha d'adaptar la tensió de cada cel·la per tal de poder fer la redistribució d'energia i això encara augmenta més el preu del sistema.

Pel que fa al software, no hi ha massa diferència entre els dos sistemes, ja que el que s'utilitza són comparadors de tensió i actuadors sobre els diversos díodes, de manera que permeti circular el corrent.

#### **5.2.4. Comunicació amb la *Main Ecu* del monoplaça.**

La protecció de les cel·les de sobrecàrregues, sobredescàrregues i sobrepassar el límit tèrmic és una de les característiques bàsiques que ha de complir un BMS. D'aquesta manera s'augmenta la vida útil de les cel·les i es millora l'eficiència del paquet de bateries.

Per tal d'aconseguir aquesta fita, és necessari que el BMS pugui comunicar-se amb la centraleta principal del monoplaça, de manera que aturi el vehicle en cas d'alarma o actuï en conseqüència.

El sistema que actualment s'empra més en el món de l'automoció és el protocol CAN de comunicació, degut a la seva robustesa.

### **5.3. Tipus de BMS.**

La manera de monitoritzar les cel·les pot ser realitzada de diverses maneres. És per això que es pot realitzar una classificació de diferents BMS que s'haurà de tenir en compte alhora d'escollir el més adequat per a incorporar al monoplaça.

#### **5.3.1. BMS centralitzat.**

El BMS d'estructura centralitzada consta d'una *Master* que s'encarrega ser el cervell, i d'*Slaves* que s'encarreguen de realitzar els censats i enviar la senyal a la *Master*. La informació arriba a la centraleta i aquesta s'encarrega de realitzar els càlculs del SOC, SOH i de protegir les cel·les. Quan detecta que una cel·la està a nivell mínim o màxim de tensió o temperatura, envia un senyal d'error per tal que s'atura la respectiva descàrrega o càrrega.

Aquest tipus de BMS la *Master* no s'encarrega en cap cas del censat, i és una PCB molt més elaborada que les *Slaves*, ja que incorpora un microprocessador. Per altra banda, les



*Slaves* poden realitzar el censat d'una cel·la, i per tant hi haurà d'haver tantes *Slaves* com cel·les es vulguin monitoritzar, o més d'una cel·la.

Pel que fa a censats de temperatura, poden estar lligats a les *Slaves* i que cadascuna faci una mesura, o poden estar lligades a la *Master*, i que aquesta monitoritzi directament alguns punts de la bateria, i no les cel·les exclusivament. D'aquesta manera s'aconsegueix reduir el cablejat intern de la bateria i, realitzant un estudi tèrmic exhaustiu, es poden determinar els punts més crítics de temperatura per a situar-hi els sensors.

### **5.3.2. BMS descentralitzat.**

Aquest tipus de BMS també té els mateixos components que un BMS centralitzat, una *Master* i *Slaves*, però en aquest tipus de centraleta la primera no fa la mateixa funció que en l'altre cas.

Per una banda, les *Slaves* realitzen els censats i els envien a través d'una xarxa interna de comunicació cap a la *Master*, tal i com fa l'altra estructura. Tot i així, la funció de la última és diferent, ja que rep les dades processades i tractades. També s'encarrega de realitzar censats de tensió d'algunes cel·les i processar les dades. Això implica que aquesta s'encarrega de rebre les dades, reagrupar-les juntament amb els seus propis censats i comunicar-se amb l'exterior, com la *Main ECU* del vehicle.

Generalment la comunicació interna d'aquest tipus de BMS és més robusta que en l'altra estructura. Això és degut a que aquestes *Slaves* disposen d'un microprocessador que permet codificar les dades i enviar-ho per CAN bus, per exemple.

En el cas que el BMS descentralitzar tingui balanceig passiu, té certa importància el fet que les PCB siguin més complexes, ja que també implica que són més robustes. D'aquesta manera permet incorporar una resistència de balanceig més gran i alhora balancejar més ràpid degut al possible increment del corrent de balanceig.

## **5.4. Tria del BMS.**

### **5.4.1. Situació inicial. [7]**

La gran quantitat de cel·les que incorpora el vehicle de *Formula Student* realitzat a l'ETSEIB implica que el BMS haurà de disposar de molts censats de tensió i temperatura.

Com a herència de CAT06e, es disposava de un sistema de BMS centralitzat amb balanceig passiu. Tot i poder adaptar la *Master*, era necessari adquirir unes *Slaves* adaptades a la nova tecnologia de cel·les, ja que les que incorporava fins al moment només servien pel tipus de cel·la cilíndrica. Aquest BMS disposava de les següents característiques:

- Marca: Elithion
- País de procedència: Estats Units
- Nombre de *Slaves*: 1 per cel·la (142 en total)
- Corrent de balanceig: 100mA.
- Comunicació exterior: CAN
- Despesa total: 2911 € (1 Master (1000€) + 142 Slaves (1911€)) + Aranzels (21%).

En les edicions anteriors de CAT05e i CAT06e aquest BMS va donar molt bon resultat, ja que va funcionar com era esperat i no va donar cap mena de problema. És per això que es va optar per donar-li continuïtat a aquest producte i es van adquirir les *Slaves* corresponents a la tecnologia adquirida per les cel·les (LiPO en format Pouch).

El BMS d'Elithion s'estructura de la següent manera (*Figura 5.3*):

Hi ha una *Master* que s'encarrega de rebre missatges de tensió i de temperatura de cada cel·la, calcula el SOC i activa les alarmes en cas de necessitat. La *Master* no rep informació de cada *Slave* per separat, sinó que les *Slaves* s'estructuren en diversos grups anomenats *Banks*. Cada *Bank* conté una *Slave* anomenada Positiva i connectada a la cel·la més positiva del *Bank*, una de Negativa situada a la seva respectiva posició i la resta (amb un màxim de 18) són *Mid-Banks*, i estan situades a les cel·les del mig.

La *Slave* Positiva i la Negativa tenen un connector on hi va un cable directament a la *Master*, i totes les *Slaves* (positives, negatives i *Mid-Banks*) estan connectades en sèrie amb el senyal de comunicació.

Cada *Slave*, a més, té un sensor de temperatura intern i dos cables (un de positiu i un de negatiu) que es connecten a cada born de la cel·la monitoritzada i a més s'encarrega d'alimentar la PCB.

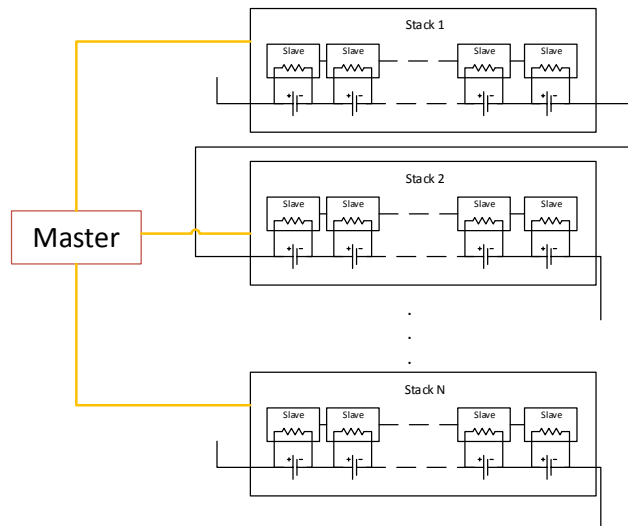


Figura 5.3 Schematic del cablejat de BMS d'Elithion.

#### 5.4.2. Conclusions experimentals.

Hi ha diversos punts que es van haver d'avaluar un cop les bateries de CAT07e van finalitzar el seu cicle de treball, és a dir al finalitzar la temporada 2013-2014. Per tal de seguir millorant, calia analitzar els errors comesos i veure quines vies s'havien de millorar:

- Problemes de interferències electromagnètiques (EMIs): Tot i ser molt difícil trobar l'arrel del problema de soroll, està relacionat directament amb el cablejat del BMS. Degut a la distribució de les bateries en dues caixes diferents i situar la *Master* fora d'ambdós paquets, aquests cables eren massa llargs. Això facilita que els senyals de control es vegin afectats per d'altres i les lectures no siguin les correctes. La conseqüència d'aquest problema era l'activació d'alarmes de sobretensió quan aquesta estava dins els límits de treball i afectava al bon funcionament del monoplaça. També hi havia diversos problemes de comunicació en alguns dels *Banks*. Aquesta alarma s'activava quan la comunicació entre *Slaves* i *Master* fallava durant 10 segons.
- Cablejat: La disposició dels *Banks* contenint cel·les de dos *Stacks* afectava als cables de comunicació entre les *Slaves* que unien cada *Stack*, ja que es veia forçat a superar la llargada màxima recomanada per el fabricant, que era de 50mm. També es veien afectats els cables de sensat de tensió degut a la disposició de les *Slaves* al *Stack*. Aquestes *Slaves* no estaven preparades per a monitoritzar cel·les de les dimensions com les escollides, i per tant no es podien instal·lar segons les indicacions del fabricant. Per a solucionar el problema es va

dissenyar una solució alternativa, viable però que afectava a la llargada del cablejat. Un gran inconvenient, a més, és la doble funcionalitat del cablejat de censat i alimentació de la Slave, ja que provoca alteracions a la mesura de tensió i provoca una distorsió del senyal. A les *Figures 5.4., 5.5. i 5.6.* es poden veure les diverses propostes i dissenys de cablejat.



Figura 5.4 Connexió de la *Slave* proposada per Elithion. [7]

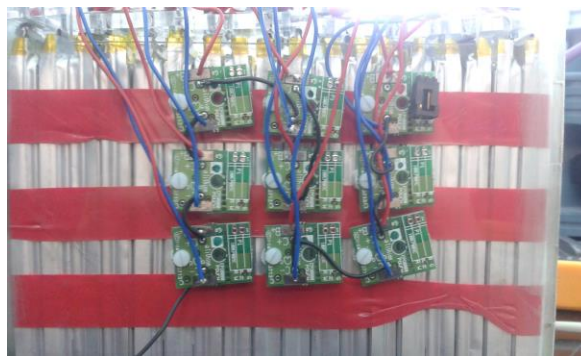


Figura 5.5 Connexió realitzada al CAT07e.

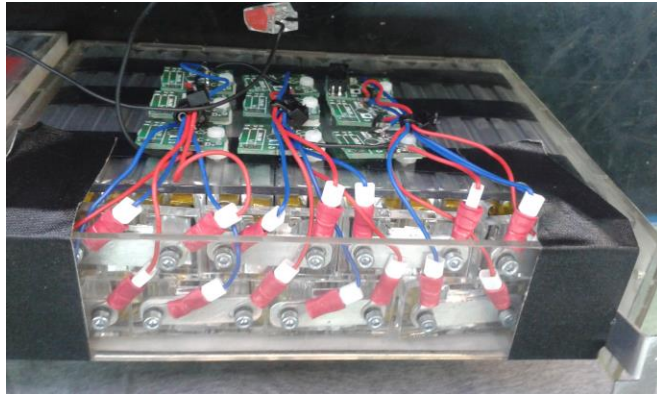


Figura 5.6 *Stack* realitzat a l'ETSEIB Motorsport.

- Fragilitat de les *Slaves*: Aquestes PCB's eren de baix cost, de manera que molts components podien veure's afectats físicament amb les vibracions del vehicle, a més de no tenir cap protecció contra els curtcircuits sense causar desperfectes irreparables.
- Balanceig lent: Les *Slaves* incorporaven una resistència de  $180 \Omega$  que permetia un corrent màxim de balanceig de 25 mA. Amb una capacitat de cel·les de 6,35 Ah i amb un sistema de dues sèries en paral·lel (12,7 Ah en total), aquesta intensitat és molt petita per a poder balancejar el total de la bateria amb poc temps.
- Duanes: Un factor clau que encareix molt el sistema és la seva procedència. Per a un projecte de autofinançat com el Formula Student és important reduir els costos. Per tant les duanes causen un impacte econòmic afegit al preu del sistema fàcilment evitable, adquirint productes de la Comunitat Europea.

### 5.4.3. **Nous objectius.**

Per tal d'adquirir un nou BMS cal saber les necessitats i les expectatives del producte.

Els aspectes més importants a tenir en compte en un BMS per a un monoplaça de Formula Student són els següents:

- Lectura de tensió de cadascuna de les cel·les que formen la bateria.
- Lectura de temperatura del 30% de les cel·les que conté la bateria.
- Càlcul del SOC.

- Comunicació per CAN per tal de saber l'estat de la bateria en cada moment (alarmes, nivells de tensió i temperatura).
- Interfície per ordinador per tal de poder canviar la tensió de balanceig i veure l'estat de les bateries.
- Balanceig passiu i corrent de balanceig ràpid.
- Protecció de les cel·les amb les alarmes d'aquest sistema.
- Cost assequible.
- Fàcil instal·lació i cablejat.

#### 5.4.4. Freemens Battery Management System.

Després de realitzar una recerca exhaustiva del mercat, aquest BMS és el que millor compleix amb les necessitats buscades.



Figura 5.7 Logotip de l'empresa del nou BMS.

És un sistema de control descentralitzat i de balanceig passiu, on totes les PCB's (*Master* i *Slaves*) controlen la tensió d'entre 9 i 10 cel·les (dependent de la posició de la placa a la bateria). La *Master* disposa d'un mòdul WiFi per a la comunicació, a més de la comunicació a través de CAN amb la *Main ECU* del monoplaça. També disposa d'una targeta de memòria MicroSD on permet programar els paràmetres del sistema manualment. El programa emprat per realitzar la configuració de les *Slaves* és el MPLAB PICkit3 de Microchip. (Figura 5.8.)



Figura 5.8 Eina emprada per a la programació del BMS.

Aquest BMS disposa d'una interfície gràfica per a ordinador i per Android, de manera que permet comunicar-se mitjançant Wi-Fi i configurar-se amb la xarxa sense fil. D'aquesta manera es pot consultar l'estat de les bateries en qualsevol moment sense haver de connectar-hi cap aparell extern mitjançant cable, que és molt comú i alhora força perillós quan s'estan realitzant proves de rodatge.

A més, aquest sistema disposa d'un sistema d'adquisició de dades que permet realitzar un anàlisi de la descàrrega i de la càrrega (temperatures, tensions i corrents).

El censat de temperatura es fa a través de 3 NTC's (AVX – ND06P00103K) (Figura 5.9.) que disposa cada *Master* i *Slave*, mesurant el 30% de les cel·les en cas de monitoritzar-ne 10 i el 33,3% en cas de monitoritzar-ne 9, de manera que complim amb la normativa de Formula Student.



Figura 5.9 Sensor de temperatura utilitzat al BMS de Freemans.

El Microchip que incorporen les PCB's és el LTC6803-1 de Linear Technology (Figura 5.10.), que té la característica de tenir una gran precisió alhora de realitzar els censats

(error màxim del 0,25%). Permet monitoritzar fins a 12 cel·les connectades en sèrie i està dissenyat ja per a controlar el balanceig passiu. [17]

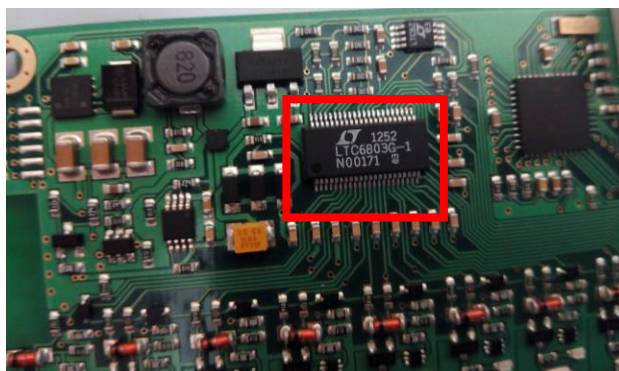


Figura 5.10 Microprocessador emprat per controlar la tensió i el balanceig.

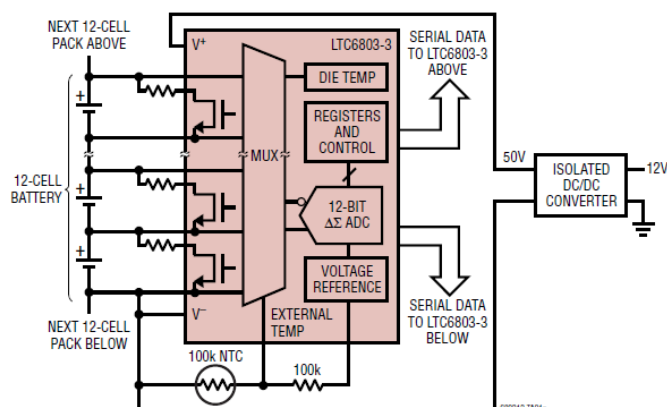


Figura 5.11 Schematic del microprocessador. [17]

La residència que incorpora cada placa per a realitzar el balanceig és de  $100 \Omega$  i permet un corrent de balanceig de 42 mA, el doble que amb l'altre sistema.

Aquest sistema també incorpora una PCB addicional (FreeSB-PR), que es pot observar a la *Figura 5.12.*, i s'encarrega de realitzar el censat de corrent i d'obrir i tancar els relés en cas de necessitat. És un mòdul optatiu que permet donar una protecció addicional a la bateria, a més de realitzar el càlcul del SOC. En cas de no incorporar-la, l'algoritme del SOC hauria de calcular-se a la *Main ECU* del vehicle, a més d'incorporar una sonda de corrent que no pertanyi a aquest sistema ja que és indispensable per a la seguretat del vehicle i per al càlcul del SOC si està basat amb el  $SOC_C$ . La *Main ECU* del monoplaça també és l'encarregada d'activar i desactivar els relés en cas d'alarma.



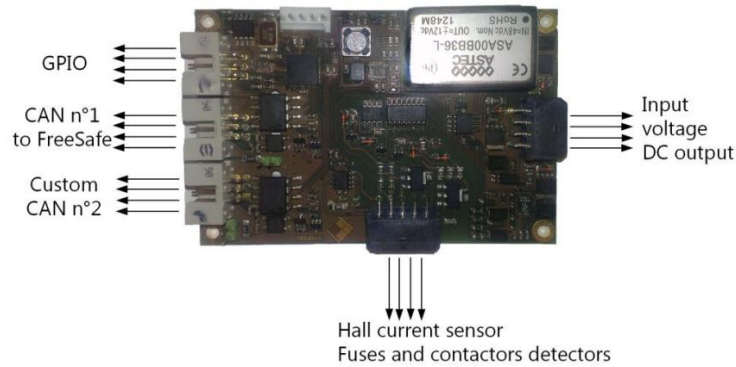


Figura 5.12 Placa de protecció del BMS de Freemans (FreeSB-PR). [14]

#### 5.4.5. Taula comparativa de BMS.

	<b>ELITHION</b>	<b>FREEMENS</b>
<b>Tipus</b>	Centralitzat	Descentralitzat
<b>Corrent de balanceig màxim</b>	100 mA	200 mA
<b>Protocol de comunicació</b>	CAN 2.0 A	CAN 2.0 B J1939
<b>Comunicació amb interfícies</b>	RS232	WiFi
<b>Màxima longitud permesa de cablejat</b>	50 mm	200 mm
<b>Lectura de temperatura</b>	Totes les cel·les	30-33% de les cel·les (dependent de la posició de la Slave)
<b>Nombre de PCB's</b>	1 <i>Master</i> + 95 <i>Slaves</i>	1 <i>Master</i> + 9 <i>Slaves</i>
<b>Cables independents alimentació-censat</b>	No	Sí
<b>Cost</b>	3522 €	2439 €

Taula 5.1 Taula comparativa de Elithion i Freemans.

### 5.4.6. Instal·lació del sistema. [14]

Per tal de fer la instal·lació del BMS, primer cal saber la distribució de les cel·les a la caixa de bateries. Està dividida en 5 *Stacks* iguals, i per tant cada *Stack* disposarà del mateix nombre de PCB's (un d'ells disposarà de la *Master* i *Slave* i la resta disposaran només de *Slaves*). Cada *Stack* té 19 cel·les en sèrie, i una PCB monitoritzarà 10 cel·les i l'altra en monitoritzarà 9.



Figura 5.13 Caixa de bateries del CAT08e.

El esquema general d'aquest BMS és el de la *Figura 5.14*:

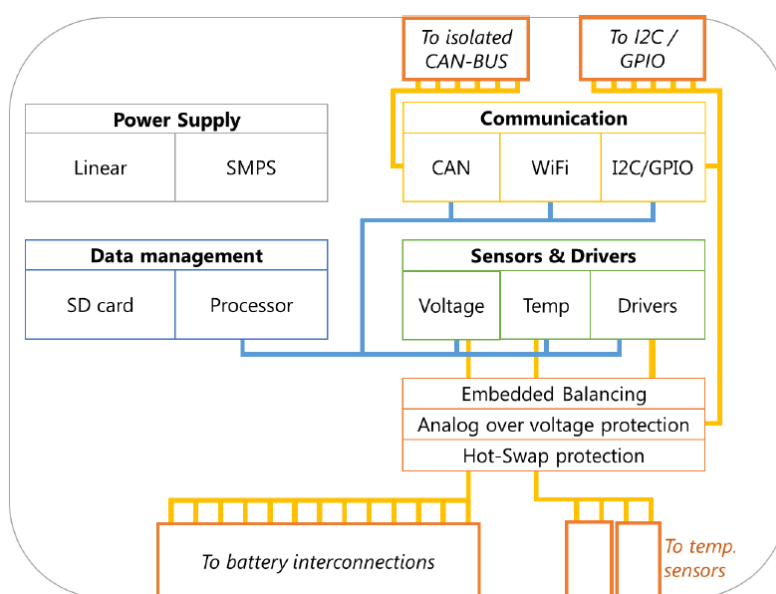


Figura 5.14 Schematic de les connexions del BMS. [14]

Tal i com està descrit al document d'instal·lació facilitat pel fabricant, la *Master* i les *Slaves* s'alimenten de tot el conjunt de cel·les monitoritzades per elles mateixes. [14] Cada *Master* i *Slave* disposa dels següents connectors, que es poden veure situats a la PCB a la *Figura 5.15*. i la seva funció a la *Taula 5.2*.

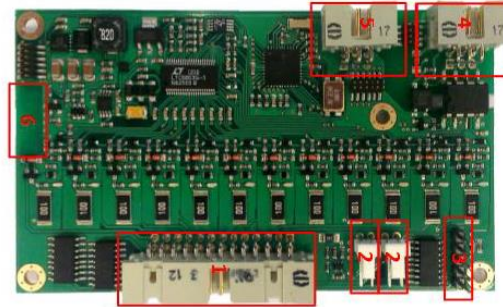


Figura 5.15 PCB del BMS de Freemens.

Número de connector	Nom del connector	Número de pins	Descripció
1	Connector cel·les	26	Censat de tensió de les cel·les i alimentació de la placa.
2	NTC nº 1	2	Censat de temperatura 1.
2 bis	NTC nº 2	2	Censat de temperatura 2.
3	Programador	6	Connector on s'hi connecta el PICKit 3 per programar la PCB.
4	I2C/GPIO	6	Connector utilitzat per al censat de temperatura 3.
5	CAN bus	5	Connector de comunicació entre plaques i amb la <i>Main ECU</i> del monoplaça.
6	Antena Wifi	1	Només existent a la <i>Master</i> . Comunicació amb la interfície gràfica.

Taula 5.2 Senyals d'entrada i sortida de la placa de BMS.

La instal·lació realitzada amb el cablejat de les PCBs del BMS és la següent:

A la *Figura 5.16.* i a la *Taula 5.3.* es troba la distribució de colors del cablejat:

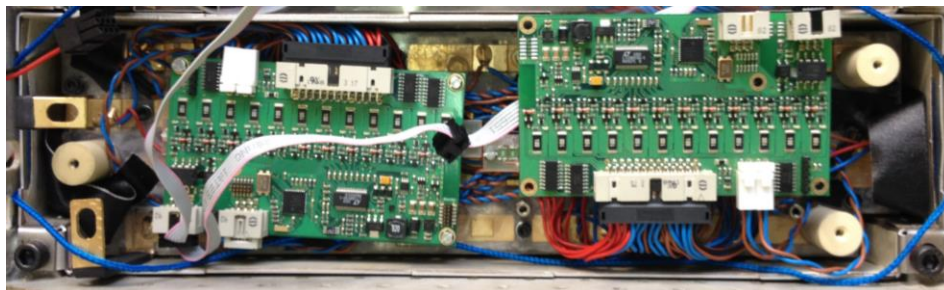


Figura 5.16 Connexió del BMS amb la bateria.

Color	Senyal
Vermell	Alimentació (+) de la PCB
Negre	Alimentació (-) de la PCB
Blau	Censat (+) de les cel·les
Marró	Censat (-) de les cel·les

Taula 5.3 Distribució de senyals per colors.

A la *Figura 5.17.* es troba l'esquema de connexions recomanat pel fabricant i utilitzat per l'equip:

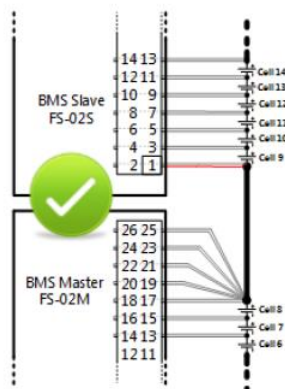


Figura 5.17 Connexió recomanada pel fabricant. [14]

A la *Taula 5.4.* es troba la instal·lació del BMS realitzada a la bateria del monoplaça en funció del número de cel·les en sèrie que controla cada PCB. La distribució de censat de tensions – PCBs queda de la següent manera:

	<b>Situació</b>	<b>Nombre de cel·les</b>	<b>Cel·les assignades</b>
Master	Stack 5	9	87-95
Slave 1	Stack 5	10	77-86
Slave 2	Stack 4	9	68-76
Slave 3	Stack 4	10	58-67
Slave 4	Stack 3	9	49-57
Slave 5	Stack 3	10	39-48
Slave 6	Stack 2	9	30-38
Slave 7	Stack 2	10	20-29
Slave 8	Stack 1	9	11-19
Slave 9	Stack 1	10	1-10

Taula 5.4 Distribució del BMS de Freemans a la bateria.

## 6. Adaptació del carregador a la bateria del CAT08e.

### 6.1. Presentació del carregador. [15]

L'ETSEIB Motorsport disposa d'un carregador desenvolupat per un exmembre de l'equip durant l'edició del CAT05e. Aquest carregador està format per un sistema compostat per un rectificador trifàsic no controlat i un convertidor *buck*.

El convertidor *buck* permet generar a la sortida del bus de contínua una tensió variable segons la tensió de la bateria. Es tracta d'una estructura senzilla de manera que només es disposa d'un semiconductor controlat per tal de realitzar el control la càrrega. A més, el convertidor està basat amb una plataforma dissenyada anteriorment a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.

La plataforma està formada per els següents components:

- Placa de potència (Semikron SkiiP 23NAB12T4v1): que inclou els semiconductors necessaris per a poder implementar un rectificador no controlat i un inversor. A part dels semiconductors inclou un bus de condensadors, que actuen com a bus de contínua, dues sondes de corrent per a mesurar el corrent a la sortida de l'equip, una sonda de corrent al bus de contínua i 3 sondes de tensió, una unipolar per mesurar la tensió del bus de contínua i dues sondes bipolars per a mesurar la tensió a la sortida de l'equip. Per tal de realitzar el control del convertidor també disposa de relés per efectuar la precàrrega del bus i sortides per a controlar contactors externs a la placa de potència.
- Placa de *Drivers* i proteccions hardware: Aquesta placa intermèdia permet primer de tot efectuar el control sobre la commutació dels *drivers* amb els nivells de tensió necessaris. Les proteccions hardware eviten que l'equip treballi en condicions no segures i envien un senyal de fallada a la placa de control en cas que detectin algun error a la placa de potència.
- Placa de control: desenvolupada al CITCEA-UPC, que inclou un DSP que s'encarrega de fer la gestió del convertidor i de les comunicacions amb altres equips externs.

## 6.2. Adaptació del carregador.

Els canvis realitzats a la bateria del CAT08e impliquen diversos canvis i millores tant a nivell de *hardware* com a nivell de *software* al carregador que disposa l'equip.

### 6.2.1. Canvis a realitzar.

Les causes d'aquests canvis són les següents:

#### Augment de la capacitat de la bateria

El corrent de càrrega màxim del carregador havia estat de 8 A en les diverses edicions anteriors. Això comportava com a màxim una hora de càrrega amb les bateries del CAT05e i CAT06e (LiFePO<sub>4</sub>), ja que tenien 8 Ah de capacitat.

Amb la millora de les bateries feta en l'edició del CAT07e, la capacitat de la bateria era de 12,7 Ah. Això comportava un temps de càrrega màxim de 1 hora i 35 minuts. Fent una estimació del temps disponible a les competicions per dur a terme la càrrega, es va decidir que aquest corrent era suficient per carregar-la.

### 2.2 SCHEDULE

#### TUESDAY, 29TH OF JULY 2014

14:00	Scrutineering, Registration & Entrance Order Available
16:00 - 18:00	FSC & FSE Team Registration
18:00 - Sun 20:00	FSC & FSE Pits Available
18:00 - 20:00	Event Control, Driver & Safety Responsible Registration
18:00 - 22:00	Entrance for Team Vehicles
20:00 - 22:00	Charging Tent
21:00 - 22:00	Team Welcome

1	Ticket Centre	
1	Ticket Centre	
4	10	Pits
2	Event Control	
21	Charging Tent	
5	Marquee above Pits	

#### WEDNESDAY, 30TH OF JULY 2014

06:00 - 22:00 daily	Charging Tent
07:30 - 19:00	Ticket Centre & Event Control
09:00 - 13:00	Scrutineering / Tech Inspection / Tilt, Brake, Noise, Rain / Fuel
13:00 - 14:00	Lunch Break & Staging for Panoramic Photograph
14:00 - 19:00	Scrutineering / Tech Inspection / Tilt, Brake, Noise, Rain / Fuel
14:00 - 19:00	Engine Test

21	Charging Tent			
1	2	Ticket Centre / Event Control		
9	10	11	12	Big Dynamic Area
17	Big Dynamic Area			
9	10	11	12	Big Dynamic Area
17	Big Dynamic Area			

#### THURSDAY, 31ST OF JULY 2014

07:30 - 19:00	Ticket Centre & Event Control
08:00 - 08:30	Team Briefing
08:30 - 19:00	Scrutineering / Tech Inspection / Tilt, Brake, Noise, Rain / Fuel
09:00 - 19:00	Engine Test / Testing
11:00 - 12:30	Judge Briefing: Business Plan, Cost & Design
12:00 - 13:00	Scrutineering Lunch Break
13:15 - 17:55	FSE Engineering Design & FSE Cost Analysis
13:30 - 18:10	FSE Business Plan Presentation
18:30 - 20:30	Judge Briefing: Cost & Design
19:00 - 20:30	FSE Business Plan Presentation Finals
20:30 - 21:30	Get-together for all Volunteers

1	2	Ticket Centre / Event Control		
5	Marquee above Pits			
9	10	11	12	Big Dynamic Area
17	Big Dynamic Area			
7	BW Tower			
5	Marquee above Pits			
7	8	BW Tower, Start-Finish Building		
7	BW Tower			
5	Marquee above Pits			
7	BW Tower			





de càrrega per tal de poder provar el vehicle durant el màxim temps possible. S'estableix com a temps màxim de càrrega 1 hora i 35 minuts, tal i com s'havia fet en l'edició anterior. El corrent de càrrega serà de 12 A per garantir aquest fet.

Per tal de calcular el temps de càrrega s'ha utilitzat l'Equació 6.1. i s'ha suposat que la bateria estava esgotada, és a dir que no restava energia disponible a cap cel·la:

$$t_{càrrega} = \frac{C}{I_{càrrega}} \cdot \frac{3600 s}{1 h} \quad (\text{Equació 6.1.})$$

### **Incorporació de l'IMD**

La norma incorporada aquesta temporada a la Formula Student obliga a incorporar l'element de seguretat *Isolated Monitoring Device* (IMD). S'encarrega de comparar els diversos terres que hi ha al monoplaça. Compara el GND del circuit de HV amb el xassís, que està marcat com a terra del circuit de LV, i mira que estiguin ben aïllats.

En cas que el funcionament del vehicle sigui correcte, l'IMD envia un senyal constant de 24 V. En cas contrari, si hi ha problemes d'aïllament, l'IMD deixa d'enviar el senyal i el *Safety Circuit* (SC) obre els relés del circuit de potència, de manera que el vehicle s'atura.

Avui en dia aquest és un element indispensable en qualsevol vehicle propulsat elèctricament i que estigui disponible al mercat.

L'IMD del monoplaça és comercial i en concret és el recomanat per la normativa, el Bender A-ISOMETER ® iso-F1 IR155-3203, i està incorporat dins la mateixa bateria del vehicle. Es pot veure la PCB a la *Figura 6.2*.



Figura 6.2 IMD utilitzat al CAT08e.

## Instal·lació del BMS

Aquest canvi de *Battery Management System* també suposa realitzar modificacions al carregador de l'equip. Aquests canvis recauen en el *Software*, ja que hi ha una variació en el protocol de CAN d'aquest element. El protocol utilitzat en el nou BMS és un dels més emprats als automòbils híbrids i elèctrics del mercat actual.

### 6.2.2. Implementació dels canvis.

El primer objectiu marcat és l'adaptació de l'IMD al carregador. Aquesta implementació suposa aquestes variacions:

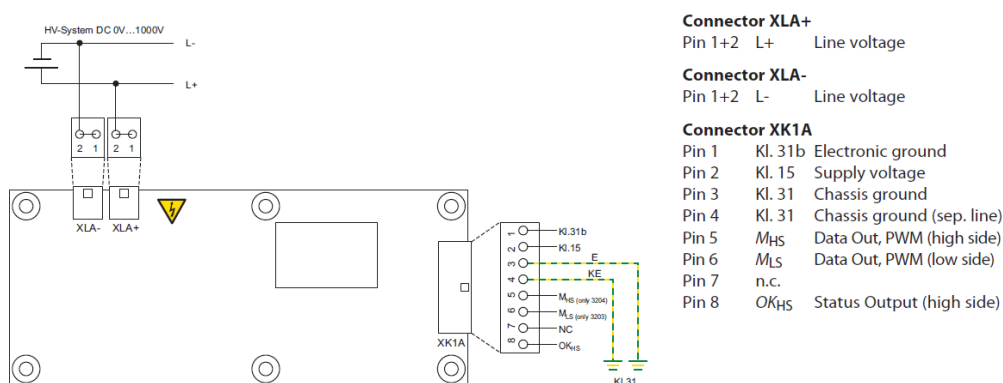


Figura 6.3 Schematic de connexió del IMD. [16]

- Cablejat de l'element dins el carregador. A la *Figura 6.3* podem veure la distribució de les senyals en els diversos connectors. S'ha utilitzat els senyals L+ i L-, que s'ha connectat als borns positiu i negatiu de la bateria (connexions internes dins la bateria), i els pins 1, 2, 3, 4 i 8 del connector XK1A, que són els senyals de GND, alimentació de 24 V, dues mesures diferents del GND del xassís i el senyal de IMD-OK. Aquest últim és el senyal de 0-24 V utilitzat per a saber si no hi ha fugues elèctriques i el vehicle és segur.

Els senyals de l'IMD s'han extret de la caixa a través d'un connector LEMO 319, i el carregador també disposa d'un connector LEMO R Multipolar, d'on aconseguim la resta de senyals necessàries. El carregador disposa d'un font de 24 V per alimentar l'IMD, i s'ha utilitzat el mateix armari del carregador com a xassís per a obtenir les dues mesures de GND. Per últim, el senyal *out* de IMD-OK està connectat a la placa de control desenvolupada al CITCEA-UPC.

- Modificacions a la placa de control: El senyal de IMD-OK és un senyal digital on el 0 equival a 0 V i el 1 equival als 24 V. Per tant, l'entrada més adient al DSP seria una entrada digital. Tot i així, aquestes entrades que disposa la placa de control són totes plenes per altres elements i s'ha hagut d'implementar aquesta alarma a través d'una entrada analògica. L'entrada de la PCB utilitzada per al senyal de IMD ha estat una entrada destinada a entrades auxiliars analògiques de l'ADC. Concretament és l'entrada 0 del connector, i és una entrada pensada per a valor de 0-10V.

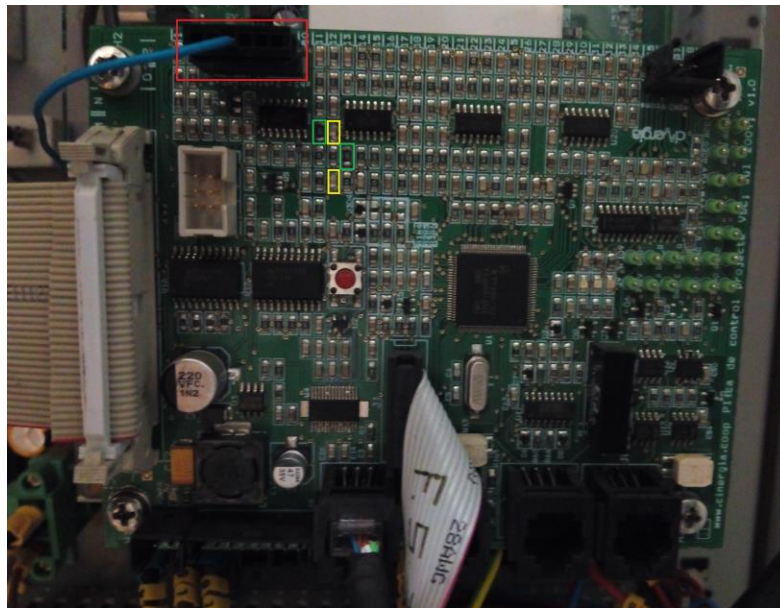


Figura 6.4 Placa de control del carregador, amb els canvis realitzats marcats.

Per tal d'adaptar el divisor resistiu, s'han canviat les resistències R138 i R147 per unes de valor 3,3 k $\Omega$  i de tipus 0805 (Posicions L13 i M11). També s'han modificat els condensadors C95 i C99 per uns altres de valor 10 nF, 25 V i de tipus 0805 (Posicions K12 i M12).

A la *Figura 6.4*, es troben els canvis realitzats a la placa de control del carregador. El connector envoltat d'un marc vermell és l'entrada del senyal IMD\_OK, i els marcs verds i grocs són les resistències i condensadors canviats, respectivament.

- A nivell de *software*, s'ha creat una alarma que en cas de rebre 0 V del senyal IMD-OK, no es podrà carregar les bateries. En altre paraules, si el circuit de potència no està ben aïllat i per tant, no és segur, el sistema queda bloquejat. El programari del DSP ha estat elaborat amb el llenguatge C++.

La segona adaptació necessària a realitzar per a que el carregador estigui operatiu és la comunicació via CAN bus del carregador i el BMS. Com ha estat comentat a l'Apartat 5.4., el protocol de CAN utilitzat en aquest element és el CAN 2.0B J1939.

Aquest protocol funciona de la següent manera:

Per una banda s'utilitzen els missatges interns del BMS per saber la tensió de cada cel·la i les temperatures dels *stacks*.

També hi ha un protocol per al propi carregador anomenat TCCharger. D'aquests missatges obtenim les següents dades:

- Corrent màxim de càrrega.
- Tensió total de la bateria.
- Alarmes en cas de temperatura màxima o tensió màxima d'una cel·la.

Message1: (ID: 0x1808E5F4)

OUT	IN	ID				Cycle Time (ms)
BMS	CCS	P	R	DP	PF	1000
		6	0	0	6	
Data						
Position	Data Name					
BYTE1	Max Allowable Charging Terminal Voltage High Byte (VOL_SET_H)		0.1V/byte offset:0 e.g. Vset=3201, its corresponding 320.1V			
BYTE2	Max Allowable Charging Terminal Voltage Low Byte (VOL_SET_L)					
BYTE3	Max Allowable Charging Current High Byte (VOL_SET_H)		0.1A/byte offset:0 e.g. Iset=582, its corresponding 58.2A			
BYTE4	Max Allowable Charging Current Low Byte (VOL_SET_L)					
BYTE5	Control		0: Charger is open and on charge. 1: Battery protection, the charger closes its output.			
BYTE6	Reserved					
BYTE7	Reserved					
BYTE8	Reserved					

Figura 6.5 Missatge de CAN emprat al carregador.

A l'Apèndix B es troba informació més detallada sobre les característiques del protocol de CAN bus del BMS i el carregador. També es troba el codi implementat en aquesta etapa d'adaptació del carregador.

Per últim, cal incrementar el corrent fins a 12 A per tal de reduir el temps de càrrega. Aquest carregador ja va ser dimensionat quan es va dissenyar per poder carregar fins a aquesta intensitat, però mai s'ha arribat a comprovar experimentalment.

Per tal d'aconseguir carregar habitualment amb aquest corrent, cal realitzar prèviament proves tèrmiques. El fet d'augmentar la intensitat provoca un sobreescalfament a les inductàncies. Per tant, s'ha de comprovar que aquestes suportin aquest corrent.

## 7. Característiques i resum de les dues etapes.

La tendència global del projecte ha estat simplificar el connexionat de la bateria i del BMS, tant per tensió com per cablejat i reduir els costos.

Mecànicament, també s'ha optat per reduir el nombre de divisions internes de la bateria per tal d'escurçar el cablejat. Pel que fa a la part elèctrica, l'objectiu ha estat donar continuïtat al mateix model de cel·la, ja triat per a dos anys vista en l'edició del CAT07e. S'ha mantingut l'energia (lleuger augment), tot i que s'ha realitzat un canvi de tensions màximes degut al nou tren de potència incorporat al vehicle.

L'objectiu marcat pel BMS ha estat simplificar el nombre de PCB's i les connexions, de manera que s'obtingués un control més fiable de l'estat de la bateria i un balanceig més ràpid. S'ha passat d'un total de 142 *Slaves* a 9.

A les *Taules 7.1. i 7.2.* es pot veure una comparativa de l'evolució dels dos vehicles.

### Bateria

Concepte	CAT07e	CAT08e
Model de cel·la	SLPBA843126	
Nombre de <i>Stacks</i>	8 (16 separacions físiques)	5
Nombre de cel·les	284	285
Distribució	142s2p	95s3p
Tensió màxima	600Vdc	400Vdc
Energia emmagatzemada	6667 Wh	6696 Wh
Corrent màxim	200 A	300 A (límit 250 A inversor)
Pes total de la bateria	52 kg (37,2 kg en cel·les)	50 kg (37,3 kg en cel·les)
Cost	5693,33 €	

Taula 7.1 Comparativa de les característiques de la bateria.

**BMS**

<b>Característica</b>	<b>CAT07e</b>	<b>CAT08e</b>
Tipus	Centralitzat	Descentralitzat
Marca	Elithion	Freemens
Nombre de PCB	1 Master + 142 Slaves	1 Master + 9 Slaves
Monitorització de Temperatura	100 % de les cel·les	30 % de les cel·les
Cost	3522 €	2439 €

---

Taula 7.2 Comparativa de les característiques d'ambdós BMS.

## 8. Conclusions.

### 8.1. Anàlisi de resultats

L'objectiu d'aquest projecte era la tria de les bateries per al monoplaça dissenyat per l'equip ETSEIB Motorsport CAT07e. Partint de les dues edicions anteriors amb un monoplaça elèctric, es buscava unes cel·les amb millors propietats elèctriques. Havien de dotar al vehicle de més potència i energia, alhora de pensar en que l'impacte econòmic seria fort per a l'equip i haurien de servir per més d'una temporada. Per tal de poder-les utilitzar al CAT08e, era necessària l'adaptació a nivell elèctric per tal de mantenir les seves prestacions.

També s'havia de contemplar la part del controlador de la bateria, el BMS, per obtenir el rendiment de la bateria esperat i protegir-la en tot moment.

Finalment, tenint en compte tots els canvis al BMS i a les bateries, ha estat imprescindible l'evolució del carregador el qual ja disposava l'equip.

Després de la realització del projecte s'han determinat aquestes conclusions:

- Per a triar les cel·les, la clau ha estat triar un model que fos força versàtil. Tenint cel·les de baixa capacitat, es pot jugar més alhora de dissenyar una distribució elèctrica de la bateria. A més, les cel·les de menor capacitat tenen millor rendiment que les de major capacitat (disposen de més densitat d'energia).
- El fet de tenir un model de cel·la tan versàtil ha permès l'adaptació a una bateria de 400Vdc de tensió màxima sense suposar un increment en el pes ni reducció de les prestacions energètiques del conjunt.
- Una acció molt important ha estat la validació experimental del model abans de muntar tot el conjunt de la bateria. Això ha permès quantificar les pèrdues de les cel·les i l'energia útil en una prova de resistència. Amb les descàrregues fetes a diferents intensitats s'ha pogut garantir que es disposa de suficient energia per acabar la prova mare de la competició de FS.
- Un BMS descentralitzat com el que s'ha emprat al CAT08e, on es controla més d'una cel·la per PCB, permet simplificar el cablejat i la instal·lació d'aquest element vital. És l'element que permet extreure el màxim rendiment al conjunt sencer de la bateria.

## 8.2. Futures línies de treball.

En el mercat actual, cada any apareixen nous models de cel·les més i més desenvolupats, amb millors prestacions per al monoplaça. Per tant, la clau d'aquest projecte, la FS, és estar assabentat de la última i millor tecnologia que es pot adquirir al mercat.

Pel que fa a les bateries de CAT09e, caldrà revisar quins models nous disposen els fabricants i prendre la decisió o no de realitzar un nou canvi. Crear una nova bateria implica una inversió d'uns 7000€, però per altra banda permetria disposar de dues bateries actives, de manera que es disposaria de molt més temps per provar al circuit.

Actualment hi ha molts rumors sobre bateries de grafè i d'alumini-aire, que permetrien reduir molt el pes d'aquestes. Dins del sector que ja es comercialitza ara, el liti, es parla de les bateries de  $\text{Li}_2\text{MnSiO}_4$ , que tindrien una densitat d'energia de 385Wh/kg.

Pel que fa al BMS es podria seguir el mateix camí que molts altres equips de FS, i seria desenvolupar una centraleta pròpia. La idea seria disposar d'un BMS adaptat a la bateria del monoplaça que permetés balancejar les cel·les i que complís amb la normativa de la competició. Un BMS desenvolupat a l'equip evitaria molts problemes d'adaptació, ja que en general costa adaptar un component comercial a una bateria dissenyada íntegrament a l'equip. Moltes vegades no es pot saber l'arrel d'un problema en el sistema pel fet de ser comercial.

Finalment, el carregador actual està limitat respecte el potencial que pot entregar. És un equip que podria preparar-se per a poder actuar com un rectificador actiu, i que permetés realitzar un cicles de càrrega i descàrrega de les cel·les.



## 9. Estudi econòmic.

Per al desenvolupant d'aquest projecte han estat necessaris tant recursos humans, degut a les hores dedicades a l'estudi per a la tria de les cel·les i el BMS, com per la programació de les millores del carregador i la redacció del treball. També s'ha requerit de recursos materials, com són la compra de les cel·les i del BMS.

El projecte s'ha dividit en 2 fases diferenciades, que han estat relacionades amb els diversos càrrecs dins l'equip:

- CAT07e: Estudi de mercat, tria de les cel·les i la respectiva compra.
- CAT08e: Experimentació amb les cel·les, tria de BMS i adaptació del carregador i redacció de la memòria.

### 9.1. Recursos humans.

El cost personal es desglossa segons l'activitat que es duu a terme durant la realització del projecte. Per fer-ho s'han comptabilitzat les hores que es dediquen a cada activitat i s'avalua el cost d'aquesta per hora. En total es calcula un cost de 22250 €, com es pot veure a la *Taula 10.1*.

Activitat	Preu per hora	Hores realitzades	Cost
Investigació	45 €/h	250 h	11250 €
Disseny	45 €/h	100 h	4500 €
Implementació	35 €/h	150 h	5250 €
Redacció	25 €/h	50 h	1250 €
<b>TOTAL</b>			<b>22250 €</b>

Taula 9.1 Recursos humans del projecte.

## 9.2. Recursos materials.

Engloba tot el material necessari per a la realització del projecte. El cost total dels recursos materials ha estat de 10469 €, com es pot observar sumant els valors totals de les *Taules 10.2. i 10.3.*:

Material		Quantitat	Preu unitari	Descompte	Cost
Cel·les: SLPBA843126		300	21,27 €/unitat	15%	5399 €
BMS: Freemens	Master	2	220 €/unitat	10%	396 €
	Slaves	12	170 €/unitat		1836 €
	FreeSB	1	130 €/unitat		117 €
	Sonda corrent	1	90 €	0%	90 €
Carregador	Cable	5	1 €/m	0%	5 €
	Connectors	4	50 €	100 %	0 €
<b>TOTAL</b>					<b>7843 €</b>

Taula 9.2 Recursos materials dedicats al projecte.

### 9.2.1. Transport i impostos.

L'impacte econòmic del transport de materials i impostos del govern afecten directament al preu final del projecte. El preu és concretament de 2626 €, que es troba a la *Taula 10.3.*:

Concepte	Cost
Transport cel·les	295 €
Duanes cel·les (30%)	1708 €
Transport BMS	130 €

IVA BMS (21%)	493 €
<b>TOTAL</b>	<b>2626 €</b>

Taula 9.3 Recursos dedicats a impostos, taxes i transport.

### 9.3. Recursos de desenvolupament.

En aquest apartat s'han valorat tots els recursos utilitzats en el desenvolupament del projecte, però que no formen part de l'estructura principal del mateix. Han tingut un efecte secundari o han servit com a eina per assolir els objectius principals. El recursos d'aquest apartat són els de la *Taula 10.4.*:

Concepte		Preu
Ordinador	MATLAB	1800 €
	CodeComposer	800 €
	Microsoft Office	600 €
	Interfície BMS	2000 €
Tester		100 €
Programador de DSPs		600 €
<b>TOTAL</b>		<b>5900 €</b>

Taula 9.4 Recursos dedicats al desenvolupament del projecte.

## 9.4. Cost total del projecte.

Sumant tots els costos anomenats als apartats anteriors, el cost total del projecte ha estat de 38619 €, del qual la major part és deguda als costos de personal, com es pot veure a la *Taula 10.5*.

Concepte	Cost
Recursos humans	22250 €
Recursos materials	10469 €
Recursos de desenvolupament	5900 €
<b>TOTAL</b>	<b>38619 €</b>

Taula 9.5 Cost total del projecte.

## 10. Impacte ambiental.

La mala gestió pel que fa al desconeixement de com realitzar un desmantellament d'un equip elèctric o com causar el menor impacte amb els residus que generen les bateries amb les quals s'ha tractat, pot causar problemes diversos. Per una banda, es pot malmetre el medi ambient, el nostre entorn, i fins i tot pot tenir conseqüències en la salut de les persones.

És per això que s'ha dut a terme un treball específic per saber quin podria ser la petjada ecològica d'aquest projecte.

### 10.1. Bateries.

El mateix fabricant de cel·les, Melasta, ha pogut facilitar la composició de la bateria i els problemes ambientals i sanitaris que aquesta pot comportar. Els elements que formen part de la bateria són els que es poden trobar a la *Taula 11.1.*:

Composició química	Nº CAS	Percentatge del pes (%)
Diòxid de cobalt de liti	12190-79-3	20-35
Alumini	7429-90-5	10-15
Liti	7439-93-2	10-15
Liti Hexafluorofosfat	21324-40-3	3-7
Carboni negre	1333-86-4	2-5
Níquel	7440-02-0	1-2
Polifluoror de Vinilidè	24937-79-9	3-6
Grafit	7782-42-5	10-16
Coure	7440-50-8	15-20

Taula 10.1 Elements que componen una cel·la. [3]

Tots aquests materials compleixen amb la normativa RoHS (Restriction of Hazardous Substances) [18]. A més, la Directiva 2012/19/UE de RAEE [19] permet gestionar l'eliminació de les cel·les portant-les a qualsevol punt verd, sense haver de realitzar cap altre acció un cop finalitzada la seva vida útil.

Pel que fa a les possibles conseqüències si s'entra en contacte amb components interns de la bateria, en cas que es trenqués el sobre de PP, serien les següents:

- Intoxicació si entra en contacte amb la pell, causant cremades.
- Ferides greus a l'ull en cas de contacte directe.
- Nociu en cas que s'ingereixi.

Les precaucions recomanades són guants i ulleres protectores alhora de treballar amb les cel·les.

En conseqüència si s'ha produït l'accident:

- Trucar al metge en cas d'intoxicació.
- Rentar amb aigua i sabó si ha entrat en contacte amb la pell.
- Mullar amb aigua durant uns minuts si hi ha danys a l'ull.
- Esbandir la boca amb aigua si s'ha ingerit. No s'ha de provocar el vòmit.

## 10.2. Aparells electrònics.

Pel que fa al carregador i al BMS, ja va esser dissenyats acomplint amb la Directiva 2012/19/UE de manera que també es pugui dur a un Punt Verd i allà s'encarreguin del desmantellament i reciclatge correctament.

## 10.3. Recursos energètics.

Tot i esser força complicat quantificar l'energia consumida alhora d'elaborar el projecte, s'ha realitzat una aproximació dels recursos emprats, que es troba a la *Taula 11.2*. Els càlculs de kg de CO<sub>2</sub> han estat realitzats segons la proposta del govern de la província d'Aragó. [20]

Procés	Consum	Hores	Total d'energia	Conversió a kg de CO <sub>2</sub>
Investigació i disseny	600 W	350 h	210000 Wh	80,85 kg
Implementació (Soldador)	100 W	5 h	500 Wh	0,1925 kg
Implementació (Programació)	600 W	75 h	45000 Wh	17,325 kg
Proves de descàrrega	300 W	5 h	1500 Wh	0,5775 kg
Proves de BMS	600 W	50 h	30000 Wh	11,55 kg
Proves de potència	15000 W	5 h	75000 Wh	28,875 kg
Transport de materials*	200000 W	25 h	5000000 Wh	1866,41 kg
Redacció (ordinador i habitabilitat)	600 W	50 h	30000 Wh	11,55 kg
<b>TOTAL</b>			<b>5392000 Wh</b>	<b>2017,33 kg</b>

Taula 10.2 Consum energètic del projecte.

Per al transport de materials s'ha considerat el consum estipulat per una persona en un avió, que és de 6,7 l/100km i 10,6 kWh equival a 1 l de gasolina. La distància s'ha considerat de 10000 km (tenint en compte els viatges de Xina per les cel·les i França pel BMS).

El factor d'emissió per a la xarxa elèctrica és de 0,385 kg de CO<sub>2</sub>/ kWh, mentre que per la gasolina és de 0,2628 kg de CO<sub>2</sub>/kWh.

## 11. Planificació del projecte.

Aquest projecte s'ha dividit en dues grans etapes. Per una banda, hi ha la tria del model de cel·la per al CAT07e i el disseny elèctric de la bateria, que es troba a la *Taula 12.1*. Es tracta de l'etapa entre l'inici de la temporada (setembre de 2013) i la finalització del disseny del vehicle (abril de 2014).

Activitat	Inici	Fi	Duració	2013				2014			
				Setembre	Octubre	Novembre	Desembre	Gener	Febrer	Març	Abril
Estudi de necessitats energètiques	01/09/2013	01/12/2013	92 d	■	■	■	■				
Recerca de models de cel·la	01/10/2013	01/03/2014	152 d		■	■	■	■	■	■	
Tria de les cel·les	01/01/2014	01/03/2014	60 d				■	■	■		
Disseny elèctric CAT07e	01/09/2013	01/03/2014	182 d	■	■	■	■	■	■	■	
Experimentació amb les cel·les i validació energètica	01/02/2014	01/05/2014	90 d					■	■	■	■

En l'edició del CAT08e se segueix desenvolupant el projecte, on s'extreuen les conclusions de la primera bateria realitzada amb cel·les de tipus sobre Li-Po i s'adapta al nou disseny de monoplaça. També s'adapta el carregador i es dona un pas endavant al adquirir una nou BMS amb millors prestacions. També es disposa de més temps per experimentar amb les cel·les i treure'n el millor rendiment possible. Una altra etapa afegida al projecte és l'adaptació del carregador a la nova normativa de FS i a la nova configuració de la bateria.

Aquesta etapa s'ha dut a terme al llarg de tota la temporada 2014-2015.

Activitat	Inici	Fi	Duració	2014						2015						
				Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol
Preparació de la temporada 2014-2015 (autocrítica i conclusions)	01/07/2014	01/10/2014	93 d	■	■	■	■									
Estudi de les necessitats del BMS	01/09/2014	01/01/2015	123 d			■	■	■	■	■	■					
Tria del BMS	01/09/2014	01/03/2015	182 d			■	■	■	■	■	■					
Implementació del BMS	01/01/2015	01/05/2015	121 d					■	■	■	■	■				
Experimentació amb cel·les i validació energètica	01/01/2015	01/04/2015	91 d					■	■	■	■	■				
Disseny elèctric CAT08e (adaptació de les bateries)	01/09/2014	01/03/2015	182 d			■	■	■	■	■	■					
Adaptació del carregador	Hardware	01/02/2015	01/04/2015					■	■	■	■	■				
	Programació	08/12/2014	14/12/2014	7 d					■	■	■	■	■			
Recopilació d'informació per a annexes	01/05/2015	15/06/2015	46 d													
Redacció de la memòria	01/04/2015	15/06/2015	76 d											■	■	■
Preparació de la presentació	15/06/2015	01/07/2015	17 d													■



## Agraïments.

En primer lloc, m'agradaria agrair al tutor del Treball de Final de Grau, el professor Daniel Montesinos, la seva ajuda i consells donats a l'hora de solucionar problemes que han anat sorgint durant la realització del projecte.

Agrair a l'equip de l'Escola, l'ETSEIB Motorsport, el seu suport i ajuda rebuda a l'hora de proporcionar-me dades necessàries per a assolir els objectius. També m'agradaria reconèixer l'esforç que fan tots els patrocinadors per a fer realitat el somni de les 31 persones que formen l'equip.

I en especial m'agradaria donar les gràcies a tota la secció de Powertrain, pel gran treball que ha realitzat durant tota la temporada.

Finalment, la força que m'ha ajudat a tirar endavant durant tota aquesta aventura a la Formula Student, agrair a la meua família i amics la paciència i dedicació a l'hora d'ajudar-me en tot el que he necessitat.

A tots, gràcies per haver fet possible aquest projecte.

# Bibliografia.

## Referències bibliogràfiques.

- [1] MELASTA: SLPBA843126 3,7 V 6350 mAh 15C Performance curves
- [2] <https://www.formulastudent.de>
- [3] MELASTA: *SLPBA843126 3,7 V 6350 mAh 15C Datasheet*
- [4] SAE INTERNATIONAL: 2015 *FSAE Rules*
- [5] <http://batteryuniversity.com>
- [6] FSG2015 Event Handbook
- [7] [http://elithion.com/lithiumate\\_.php](http://elithion.com/lithiumate_.php)
- [8] <http://www.mpoweruk.com/>
- [9] Estudi i simulació del comportament energètic del vehicle elèctric. Humbert Vidal.
- [10] Disseny, control i implementació d'un inversor trifàsic per un vehicle elèctric. Jordi Abante.
- [11] A UNIVERSAL STATE-OF-CHARGE ALGORITHM FOR BATTERIES. Electrical Engineering Dept., University of California, Los Angeles., 2010
- [12] Emrax 228 HV, Enstroj. *Datasheet*
- [13] Mavilor MA-55, Infranor. *Datasheet*
- [14] Freemans BMS. *Datasheet*.
- [15] Disseny i construcció d'un carregador per a les bateries del vehicle elèctric de l'ETSEIB Motorsport. Tomàs Lledó.
- [16] IMD Bender A-ISOMETER ® iso-F1 IR155-3203 *Datasheet*
- [17] Linear Technology LTC6803-1 *Datasheet*
- [18] Directiva 2002/95/EC de Restriction of Hazardous Substances (RoHS)
- [19] Directiva 2012/19/UE de Residus d'Aparells Electrònics i Elèctrics (RAEE)
- [20] Càlcul d'emissions de CO<sub>2</sub>. Província d'Aragó.

**[21]** Caracterització i simulació d'un vehicle de competició elèctric de la Formula Student.  
Víctor Calvo.

## **Bibliografia complementària.**

FSE\_Rules\_2015\_v1.2.0

<https://www.formulastudent.de/esf>

<http://www.elseib-motorsport.upc.edu/>

[http://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/desarrollan-nueva-generacion-baterias-coches-electricos/20150521185623009481.html?utm\\_content=buffer44666&utm\\_medium=social&utm\\_source=twitter.com&utm\\_campaign=buffer](http://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/desarrollan-nueva-generacion-baterias-coches-electricos/20150521185623009481.html?utm_content=buffer44666&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer)