

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Màster:

AUTOMÀTICA I ROBÒTICA

Tesi de Màster

IMPLEMENTACIÓ DE UNA XARXA CAN PER LA SINCRONITZACIÓ I
DIAGNOSTIC DE FALLADES DELS INVERSORS D'UN MOTOR LINEAL DE
RELUCTÀNCIA

Ramon Serra i Mendoza

Director: Manel Velasco García

Curs Acadèmic 2014-15

Juny 2015

Resum.

Aquest treball consisteix en la implementació de una xarxa CAN (Controlled Area Network) per interconnectar 2 inversors corresponents a 2 motors lineals i un circuit de control central encarregat de coordinar les accions, verificar falles, enviar dades dels motor i rebre ordres via Bluetooth des de un dispositiu extern (mòbil o PC).

Els inversors van ser desenvolupats per l'autor per al projecte Tren Electromagnètic (Telmag) en l'any 2006, llavors es va desenvolupar la aplicació per controlar els motors però sense comunicació entre els motors ni comunicació externa.

Per desenvolupar aquest projecte es faran servir els esmentats inversors, basats en comportes IGBTs, comandades per un microcontrolador dsPIC 30F4011 i sensors de posició inductius.

El projecte Telmag, consisteix en un desenvolupament tecnològic de 40 anys d'investigació, que consisteix en la recerca de un sistema de tracció lineal amb un baix cost de construcció de la via, baix costos de manteniment, amb una gran capacitat de tracció que permeti superar fortes pendent i que sigui impossible el seu descarrilament.

Agraïments.

Aquest postgrau marca una una fita important de la meua vida acadèmica, laboral i sentimental, ja que marca el inici de un gran viatge migratori i de restabliment de la família. Vull agrair a totes les persones que de una forma o altra han contribuït en aquesta fita.

Al meu tutor de tesi, el professor Manel Velasco, a qui jo vaig consultar per desenvolupar una xarxa de comunicació CAN per a aquest projecte, i em va suggerir fer-ho com a tesis del màster.

Al professor Cecilio Angulo, qui em va orientar i donar la empenta final per acabar aquest llarg treball.

Al professor Carles Paul qui va fer possible que el projecte comptés amb el suport del Tecno-campus - Mataró, per disposar d'un lloc quan van arribar els motors, el motllo i part de les vies des de Venèuela, construir les noves parts dels motors i oferir la possibilitat de generar treballs de final de carrera pels alumnes del Tecnocampus.

A l'empresa Carrocerias Chama C.A. a Venèuela, qui van donar el motllo amb el qual es va construir la nova via.

A l'empresa Decomol S.L., qui va preparar el motllo i recomanar els materials que millor s'adaptaven a la finalitat de la via.

Al meu company d'estudis Julián González, qui em va ajudar amb la diagramació de aquest treball en LaTeX.

Al meu pare, qui va ser el coordinador del projecte *Telmag* dins la Universitat, i en va a ensenya no només tot ho relacionat amb aquest projecte, sinó que també en va ensenyar el valor de la recerca. Ha sigut sempre un referent a la meua vida.

Als meus oncles Pere i Maria, que em van obrir les portes de la seva casa i el seu cor quan vaig arribar a Barcelona.

Als meus cosins Leonor, Jordi, Norbert i Alfred, qui van donar-me un gran suport durant el postgrau.

A la meua sogra Rosa, que al igual que els meus oncles, em van obrir les portes de la seva casa i el seu cor.

A la meua mare i els meus germans, que van ser un suport incondicional i em van ajudar molt a fer possible la realització de aquest postgrau, i a més a més s'han embarcat amb mi a l'aventura d'emigrar i crear una empresa.

A la meva dona Sandra i a la meva petita filla Júlia, que van ser un gran suport i ajuda, a més de que han sabut comprendre'm per tot el temps que no els he pogut dedicar per aquest projecte. Han estat font d'inspiració per fer aquest postgrau.

Dedico aquest treball als meus pares, als meus germans, a la meva dona i a la meva filla. I espero que puguem seguir reunits pel molts anys.

Índex de continguts

1	Introducció.	1
1.1	Motivació.	1
1.2	Objectius generals.	1
1.3	Objectius concrets.	1
1.4	Abastament de la tesi.	2
2	Estat de l'art.	3
2.1	Descripció del Projecte.	3
2.2	Història del projecte.	4
2.3	Motor lineal.	6
2.4	Motor de reluctància.	7
2.5	Teoria de funcionament.	9
2.6	Descripció del sistema de control existent al <i>Prototip 7</i>	11
2.6.1	Font d'alimentació.	11
2.6.2	Sensors de posició.	12
2.6.3	Circuit de control.	12
2.6.4	Mesurament del Corrent.	14
2.6.5	Circuit de Control de Potència.	15
2.6.6	Disposició final.	17
2.6.7	Programa del microcontrolador.	17
3	Desenvolupament del Hardware del <i>Prototip 8</i>.	19
3.1	Riell.	19

3.2	Bogie.	23
3.2.1	Instal·lació de les bateries.	23
3.2.2	Rodes.	24
3.2.3	Sensors de posició.	24
3.2.4	Circuit de Control i comunicació sense fils.	25
3.2.5	Disposició final.	26
4	Desenvolupament del Software del <i>Prototip 8</i>.	29
4.1	Programa dels motors.	29
4.1.1	Funcions i característiques del programa.	29
4.1.2	Algoritme de detecció de falles.	31
4.1.3	Anàlisi de velocitat i sentit de marxa.	31
4.1.4	Xarxa CAN.	32
4.2	Programa de control central.	35
4.2.1	Funcions i característiques del programa.	35
4.2.2	Algoritme de detecció de falles.	37
4.2.3	Càlcul de velocitat i ubicació sobre la via.	37
4.2.4	Xarxa CAN.	37
4.2.5	Comunicació Bluetooth.	39
5	Conclusions	41
6	Projectes a Futur.	43
A	Programa dels motors.	45
A.1	Inicialització de variables i constants del programa	45
A.2	Inicialització i validació dels paràmetres del sistema	48
A.3	Rutina de lectura i validació dels sensors de posició	55
A.4	Cicle principal de Programa	57
A.5	Rutina d'anàlisi dels senyals dels sensors de posició	68
A.6	Rutina de càlcul de velocitat	73

A.7 Rutina de càlcul per a la marxa endavant	75
A.8 Rutina de càlcul per a la marxa enrere	77
A.9 Rutina d'actualització de sortides	79
A.10 Rutina que s'executa si el processador s'ha reiniciat per falla	81
A.11 Registre de dades en EEPROM per a depuració del programa	84
B Programa de control central.	89
B.1 Inicialització de variables i constants del programa	89
B.2 Inicialització i mesura dels paràmetres del sistema	93
B.3 Cicle principal de Programa	105
B.4 Rutines d'enviament per bluetooth	121
B.5 Rutina per enviar dades al bluetooth via USART	128
B.6 Rutina d'enviament per CAN	130
B.7 Rutina que s'executa si el processador s'ha reiniciat per falla	131
B.8 Rutina per administrar les interrupcions	133

Índex de figures

2.1	Motor rotatiu vs. Motor lineal.	6
2.2	Motor de Reluctància de Taylor.	7
2.3	Cross-section of switched reluctance machine with 6 stator and 4 rotor poles. Notice the concentrated windings on the stator poles.	8
2.4	Vista general del Bogie a la Via.	9
2.5	Tall longitudinal del motor.	9
2.6	Seqüència de desplaçament.	10
2.7	Rodes colectores d'energia.	11
2.8	Font d'alimentació.	12
2.9	Disposició dels Sensors sobre el Motor.	12
2.10	Circuit de control.	13
2.11	Diagrama Circuit de control	14
2.12	Circuit de mesura del corrent.	14
2.13	Diagrama Circuit de mesura del corrent	15
2.14	Driver IGBT Fairchild.	15
2.15	Circuit de control de potencia.	16
2.16	Diagrama Circuit de potencia.	16
2.17	Disposició final del sistema de control.	17
3.1	Telmag - Prototip 8.	19
3.2	Disposició dels nuclis dins del motllo.	20
3.3	Motllo amb els nuclis abans de posar la tapa.	20
3.4	Fixació elàstica dels nuclis.	21

3.5	Motllo tancat.	21
3.6	Proces de buidatge.	22
3.7	Riell desemmotllat.	22
3.8	Riell terminat.	22
3.9	Bogie Prototip 8.	23
3.10	Cel·la de Liti del banc de bateries.	24
3.11	Noves rodes.	24
3.12	Nous sensors de posició.	25
3.13	Circuit de control principal.	25
3.14	Mòdul de comunicació Bluetooth.	26
3.15	Diagrama Circuit de Control principal.	26
3.16	Disposició final del Prototip 8.	27
4.1	Sentit de desplaçament amb la bobina A o la E	32
4.2	Comunicació des de dispositiu mòbil amb la aplicació Blueterm.	40

Diagrames

1	Inicialització i Mesura de Paràmetres del sistema.	49
2	Rutina de validació dels sensors de posició.	55
3	Cicle principal de Programa (1/5).	57
4	Cicle principal de Programa (2/5).	58
5	Cicle principal de Programa (3/5).	59
6	Cicle principal de Programa (4/5).	60
7	Cicle principal de Programa (5/5).	61
8	Rutina d'anàlisi dels senyals dels sensors de posició (1/2).	69
9	Rutina d'anàlisi dels senyals dels sensors de posició (2/2).	70
10	Rutina de càlcul de velocitat.	73
11	Rutina de càlcul per a la marxa endavant.	75
12	Rutina de càlcul per a la marxa enrere.	77
13	Rutina d'actualització de sortides.	79
14	Rutina que s'executa si el processador s'ha reiniciat per alguna falla.	81
15	Inicialització i mesura de Paràmetres del sistema (1/4).	94
16	Inicialització i mesura de Paràmetres del sistema (2/4).	95
17	Inicialització i mesura de Paràmetres del sistema (3/4).	96
18	Inicialització i mesura de Paràmetres del sistema (4/4).	97
19	Cicle principal de Programa (1/9).	105
20	Cicle principal de Programa (2/9).	106
21	Cicle principal de Programa (3/9).	107
22	Cicle principal de Programa (4/9).	108
23	Cicle principal de Programa (5/9).	109
24	Cicle principal de Programa (6/9).	110
25	Cicle principal de Programa (7/9).	111
26	Cicle principal de Programa (8/9).	112
27	Cicle principal de Programa (9/9).	113
28	Rutina que s'executa si el processador s'ha reiniciat per alguna falla.	131

Índex de taules

2.1	Història del projecte	4
3.1	Especificacions del riell	23
3.2	Característiques del sistema de bateries	24
4.1	Seqüència de connexió dels sensors	31
4.2	Identificador de missatge.	33
4.3	Dades enviades pel motors via bus CAN.	33
4.4	Màscares i filtres del mòdul CAN del Bogie 1.	34
4.5	Màscares i filtres del mòdul CAN del Bogie 2.	34
4.6	Buffers d'entrada dsPIC30F4011.	35
4.7	Dades enviades pel controlador central via bus CAN.	38
4.8	Màscares i filtres del mòdul ECAN del PIC18LF2580.	39
4.9	Buffers d'entrada PIC18LF2580.	39

Capítol 1

Introducció.

1.1 Motivació.

El sistema convencional de propulsió i guiatge que utilitzen els trens actualment podem considerar que esta desfasat. És necessària una gran infraestructura de línies de alta tensió per subministrar l'energia elèctrica que necessita el tren per desplaçar-se a altes velocitats i el sistema de vies per conduir el tren és el mateix ara que fa 150 anys.

La conducció sobre vies és un sistema altament perillós per la possibilitat de descarrilament, sobretot a altes velocitats, i tanmateix es un sistema deficitari perquè no permet superar pendents lleugerament pronunciades.

Els trens del futur estaran basats en un sistema de energia per bateries elèctriques que evitaran la instal·lació de la catenària i un sistema de guiatge i propulsió sobre un carril electromagnètic. La principal avantatge és que el seu descarrilament és impossible. Actualment hi han els Maglev que son trens de levitació magnètica, però no cal la levitació per obtenir un sistema ferroviari segur. El Telmag tant pot funcionar amb levitació o sobre rodes. Aquestes rodes no son motrius, la tracció i guiatge son totalment magnètics i les rodes fan de suport a la sustentació del tren sobre la via. Aquest sistema de propulsió és totalment segur i alhora pot superar fortes pendents amb gran facilitat.

1.2 Objectius generals.

Desenvolupar un sistema de control aprofitant el Hardware existent que permeti controlar a distancia 2 motors lineals.

1.3 Objectius concrets.

Implementar una xarxa de comunicació segura que permeti controlar els 2 inversors de cada un dels 2 motors que conformen el vagó.

Dissenyar una comunicació que permeti controlar paràmetres com direcció de funcionament, frenada i potència, i també l'enviament de missatges de l'estat dels motors, temperatura, tensió, problemes detectats.

Dissenyar un sistema segur, que a més a més en cas de detectar problemes desconnecti els motors.

Implementar un controlador central que coordini la xarxa, envii les comandes als motors i rebí la informació de l'estat dels mateixos.

Implementar una via de comunicació entre controlador central i un dispositiu portàtil per rebre ordres de forma remota i enviar informació rellevant dels motors.

Adaptar el Hardware a les noves necessitats de control.

1.4 Abastament de la tesi.

Dissenyar el software dels inversors dels motors i el controlador central per assolir els objectius del treball, intentant aprofitar com sigui possible el Software i el Hardware desenvolupat prèviament.

En els motors s'han de implementar les noves millores i adequar-los a les noves necessitats. També s'ha de construir una pista per fer les proves.

Alguns detalls constructius i de funcionament del motor no es poden explicar en aquest document degut a que son propietat industrial de l'empresa Innovació Electrònica i Mobilitat S.L.

Capítol 2

Estat de l'art.

2.1 Descripció del Projecte.

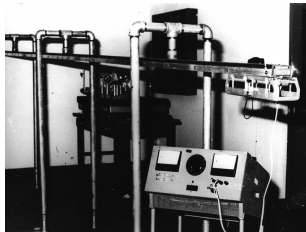
El Tren Electromagnètic és un Projecte iniciat en l'Institut Venecolà d'Investigacions Científiques (IVIC) en l'any 1967, posteriorment desenvolupat en la Universitat dels Andes (ULA) a Venèçuela i finalment portat a terme dins de l'empresa *Innovació electrònica i Mobilitat S.L.* en el *Tecnocampus de Mataró* (Barcelona), amb el suport del *departament d'enginyeria electrònica i enginyeria mecànica* de la *EUPMT*. El Telmag és un sistema electromagnètic de transport massiu terrestre, no rodant, que no requereix de la fricció mecànica per a la seva propulsió i guia com els trens convencionals.

La idea fonamental d'aquest sistema consisteix a utilitzar un Motor Lineal de Reluctància per a la seva propulsió, guia i sustentació. Aquest motor utilitza les mateixes forces electromagnètiques que propulsen als motors rotatius, només que en comptes d'utilitzar una transmissió per a aplicar el parell a les rodes, aplica aquestes forces electromagnètiques directament entre el vehicle i el rail, la qual cosa disminueix considerablement la fricció i el desgast mecànic. A més a més, no posseïx limitació en pendents, ja que no requereix d'una fricció roda-rail per a la seva propulsió. Es vol fer una proposta que pugui simplificar i disminuir significativament els costos dels sistemes de propulsió lineal.

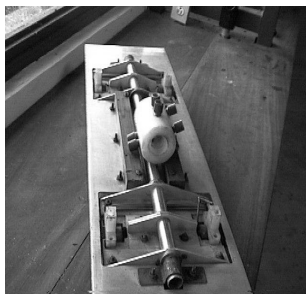
2.2 Història del projecte.

Al llarg dels anys de desenvolupament del projecte Telmag, s'han construït 8 prototips a escala, utilitzant el principi del motor lineal de reluctància.

Taula 2.1: Història del projecte



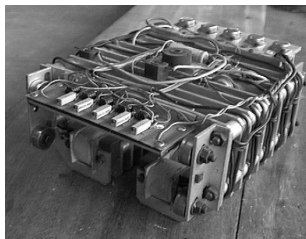
Prototip 1 (1971). Desenvolupat a l'IVIC, va consistir en un motor de reluctància rotatiu que interactuava amb una banda lineal ferromagnètica.



Prototip 2 (1981). Desenvolupat a la Universitat dels Andes, es va descartar el motor rotatiu pel motor lineal. El rotor (inductor) és linealitzat. El col·lector del rotor és substituït per un sistema mecànic de commutació similar al sistema anterior, utilitzant un petit motor rotatiu i un commutador.

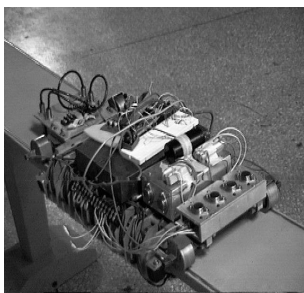


Prototip 3 (1984). Presenta millores en el disseny mecànic del boggie. A més a més, el commutador mecànic va ser substituït per un electrònic, amb sensors magnètics per examinar la posició relativa Vehicle - Riel. Aquest és el primer prototip a utilitzar un sistema electrònic de commutació



Prototip 4 (1986). La característica més important d'aquest prototip van ser el disseny del xassís, més rígid i lleuger que en el prototip anterior, i un controlador electrònic millorat. Igualment el disseny del riel va millorar apreciablement, substituint les planxes de ferro per nuclis de ferro col·locats transversalment a la via.

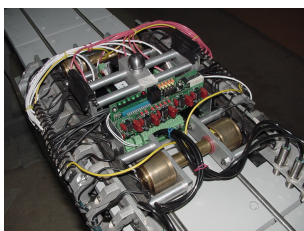
Taula 2.1: Història del projecte (continuació)



Prototip 5 (1991). En aquest model es presenta l'evolució més important que ha tingut el riell. La primera millora consisteix en un motor lineal de doble efecte, és a dir, els electroimants inductors ataquen per banda i banda del riell, disminuint així la mida dels nuclis de ferro, la qual cosa disminueix el cost del riell. La segona millora consisteix en fer una via de formigó, on les armadures de ferro van immerses en el formigó per la seva fixació i protecció, això simplifica molt la construcció. Un altre dels avenços més importants realitzats en aquest prototip el constitueix l'electrònica de control. Per primera vegada s'introdueix un microcontrolador (l'Intel 8748H) i transistors IGBT per optimitzar el inversor.



Prototip 6 (2000). La seva principal característica és un xassís millorat, el qual utilitza les armadures del circuit magnètic com a part estructural i amb peces elaborades per fosa. A més d'una disminució en el nombre d'armadures al riell. El rendiment de l'inversor va ser millorat utilitzant 2 transistors per fase per recuperar l'energia emmagatzemada en l'electroimant durant la desconexió.



Prototip 7 (2006). En aquest prototip es van realitzar millores en els vehicles i la via, però principalment té un nou sistema de control independent per a cada un dels quatre motors. Cada controlador es conforma principalment d'un dsPIC 30F4011 i transistors IGBT Fairchild FCAS50SN60.

Taula 2.1: Història del projecte

Aquest treball es basarà en el nou *Prototip 8*, en el qual s'utilitzarà part de l'electrònica i el Software desenvolupat per el *Prototip 7*, se optimitzarà el funcionament de l'inversor per adaptar-se a les noves modificacions del motor.

2.3 Motor lineal.

“A linear motor is an electric motor that has had its stator and rotor ”unrolled“ so that instead of producing a torque (rotation) it produces a linear force along its length. However, linear motors are not necessarily straight. Characteristically, a linear motor’s active section has ends, whereas more conventional motors are arranged as a continuous loop.

The most common mode of operation is as a Lorentz-type actuator, in which the applied force is linearly proportional to the current and the magnetic field

$$\vec{F} = I \vec{L} \times \vec{B}$$

Many designs have been put forward for linear motors, falling into two major categories, low-acceleration and high-acceleration linear motors. Low-acceleration linear motors are suitable for maglev trains and other ground-based transportation applications. High-acceleration linear motors are normally rather short, and are designed to accelerate an object to a very high speed, for example see the coilgun.

High-acceleration linear motors are typically used in studies of hypervelocity collisions, as weapons, or as mass drivers for spacecraft propulsion. They are usually of the AC linear induction motor (LIM) design with an active three-phase winding on one side of the air-gap and a passive conductor plate on the other side. However, the direct current homopolar linear motor railgun is another high acceleration linear motor design. The low-acceleration, high speed and high power motors are usually of the linear synchronous motor (LSM) design, with an active winding on one side of the air-gap and an array of alternate-pole magnets on the other side. These magnets can be permanent magnets or energized magnets. The Shanghai Transrapid motor is an LSM.” [28]

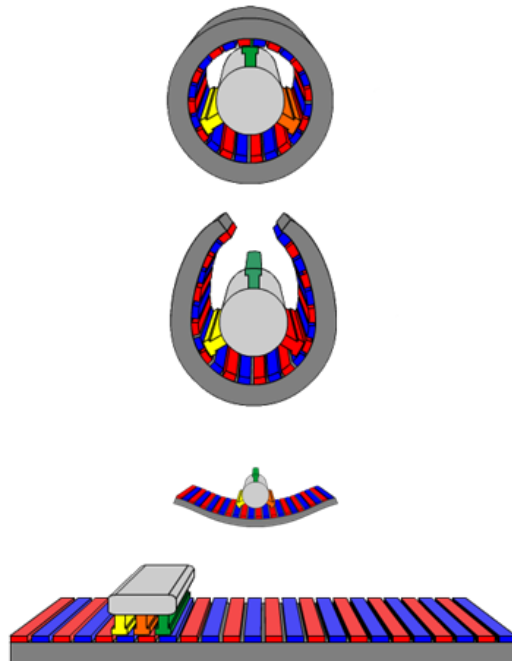


Figura 2.1: Motor rotatiu vs. Motor lineal.

2.4 Motor de reluctància.

Casualment, un dels primers motors elèctrics coneguts és el motor de Taylor patentat en 1839 (figura 2.2). Era un motor de reluctància que consistia en una roda de fusta amb 7 segments de ferro col·locats al seu voltant, i 4 bobines formant l'estator que es connectaven elèctricament a través d'un commutador en l'eix. [26]

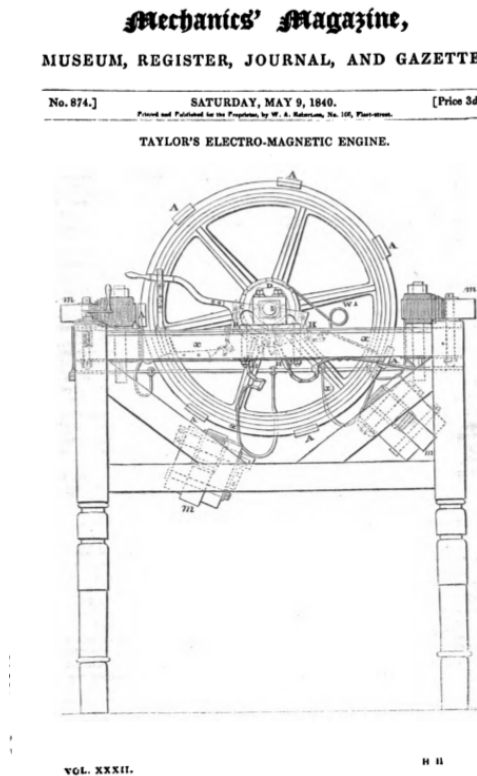


Figura 2.2: Motor de Reluctància de Taylor.

El motor lineal de reluctància treballa sota el mateix principi del motor de reluctància rotatiu. La seva linealització es fa de la mateixa manera que es va explicar en el apartat de Motors Lineals.

“A reluctance motor is a type of electric motor that induces non-permanent magnetic poles on the ferromagnetic rotor. Torque is generated through the phenomenon of magnetic reluctance.

There are various types of reluctance motor:

- Synchronous reluctance motor.
- Variable reluctance motor.
- Switched reluctance motor.
- Variable reluctance stepping motor.

Reluctance motors can deliver very high power density at low cost, making them ideal for many applications. Disadvantages are high torque ripple (the difference between maximum and

minimum torque during one revolution) when operated at low speed, and noise[clarification needed] caused by torque ripple. Until the early twenty-first century their use was limited by the complexity of designing and controlling them. These challenges are being overcome by advances in the theory, by the use of sophisticated computer design tools, and by the use of low-cost embedded systems for control, typically based on microcontrollers using control algorithms and real-time computing to tailor drive waveforms according to rotor position and current or voltage feedback. Before the development of large-scale integrated circuits the control electronics would have been prohibitively costly.” [29]

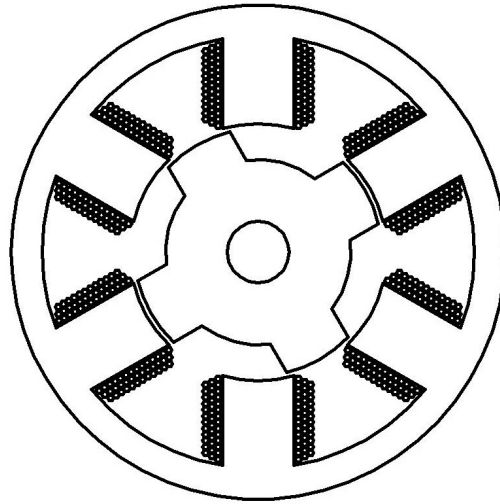


Figura 2.3: Cross-section of switched reluctance machine with 6 stator and 4 rotor poles. Notice the concentrated windings on the stator poles.

El motor del projecte Telmag es un Motor Lineal de Reluctància Commutada. Malgrat les complicacions des del punt de vista de control, té el gran avantatge que permet construir una via (la qual es part del motor) amb només uns nuclis de ferro, per tant el cost de construcció i manteniment baixen considerablement en comparació amb una via que hagi de ser bobinada.

2.5 Teoria de funcionament.

Partint de la topologia d'un motor lineal, transformant la meitat del motor en el vehicle i l'altre meitat del motor en la via, se obté un sistema de propulsió que pot servir per propulsar un tren com és el cas del projecte en estudi. Hem de tenir en compte que hi ha una gran diferència de longitud entre una part del motor i l'altre, ja que la via té una longitud indefinida en comparació a la longitud del vehicle, per tant la part del motor que anomenem via ha de ser una part molt simple de construcció i manteniment.

En aquest cas la via està formada per una pista de concret dins de la qual es fixen les armadures o nuclis de ferro. Aquests es distribueixen longitudinalment a cada costat de la pista i estan separats regularment. Per sobre i per sota de la pista van col·locats, paral·lela i longitudinalment a ella, els electroimants del primari o estator fix en el vehicle.

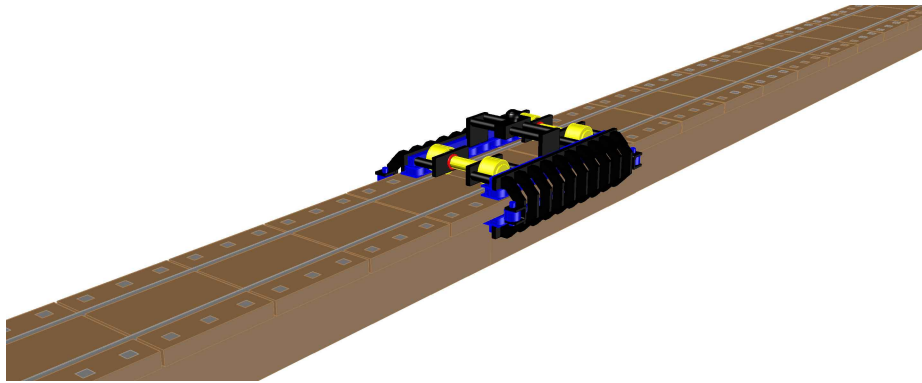


Figura 2.4: Vista general del Bogie a la Via.

A la figura 2.5 es representa un tall longitudinal del motor. Cada conjunt de quatre electroimants (per exemple A A' a' a) forma un circuit magnètic que es tanca a través dels entreferros i dues armadures de la pista. La secció dels pols dels electroimants és igual a la secció de les armadures. Els pols estan separats entre si per 35 mm. En canvi, la distància entre les armadures és de 60 mm. Per això, la posició relativa dels electroimants respecte de les armadures es repeteix cada 5 pols dels electroimants o cada 3 armadures. Per tant, es tracta d'un motor lineal de reluctància commutada, de 5 fases.

La distribució dels electroimants i de les armadures és tal, que per a qualsevol posició el vehicle pugui ser propulsat cap endavant o cap enrere depenent del conjunt d'electroimants que es energitza. Per exemple, a la figura 2.5, si només s'energitza el conjunt d'electroimants D, el vehicle es desplaçarà cap a la dreta. El conjunt C el desplaçaria cap a l'esquerra.

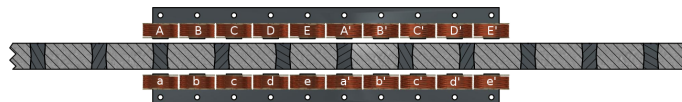


Figura 2.5: Tall longitudinal del motor.

Ara suposem que volem desplaçar el vehicle cap a la dreta, i per a això es connectaran les bobines en la seqüència $(D \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow A)$. Això generarà una seqüència de desplaçament com pot observar-se en la figura 2.6.

Al final d'aquesta seqüència podem observar que el vehicle es troba en la mateixa posició

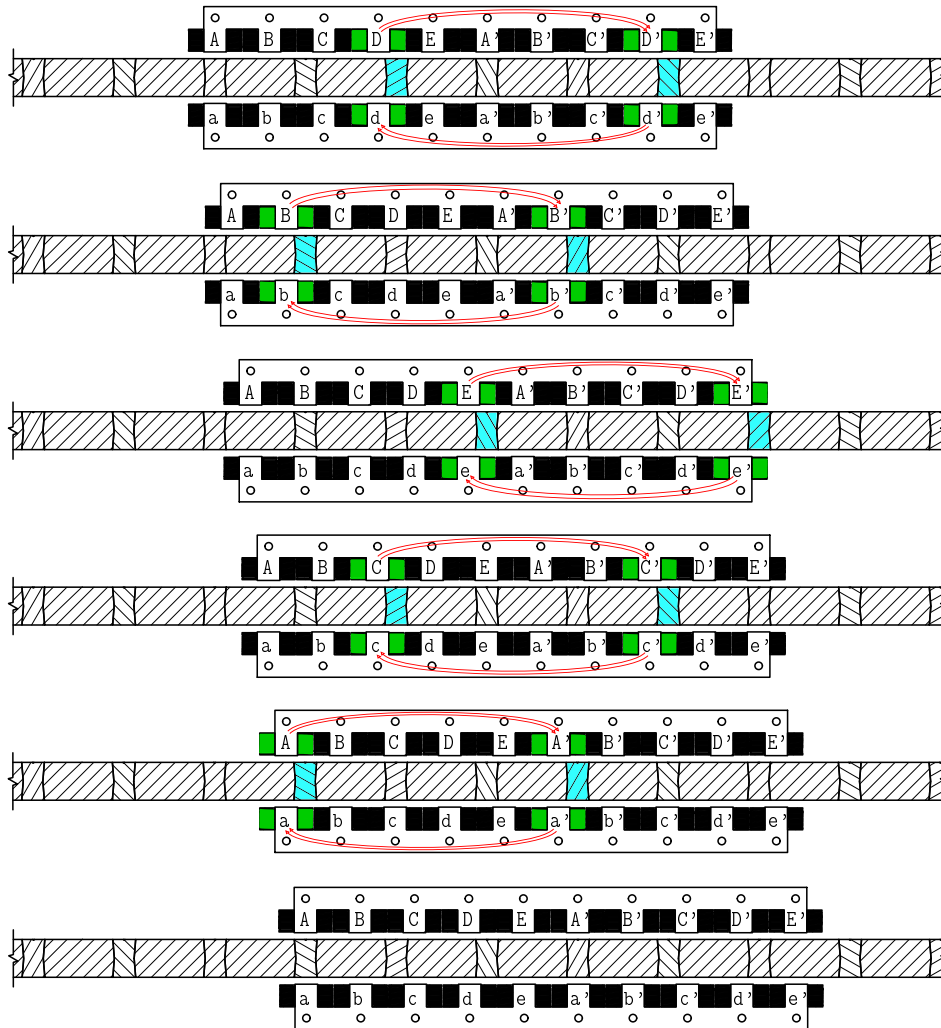


Figura 2.6: Seqüència de desplaçament.

relativa que al principi, només que s'ha desplaçat la longitud d'un nucli de la via.

Quan un conjunt d'imants adquireix la posició de mínima reluctància o màxima inductància ha de ser desconnectat. A la pràctica ha de ser desconnectat una mica abans a causa de la inductància de les bobines. De fet, la posició òptima a la qual ha d'ocórrer la commutació varia amb la velocitat del motor.

Un dels avantatges d'aquest tipus de motor és la seva gran capacitat de dissipació de calor, pel fet que l'induït o riel, per ser de gran longitud, es troba sempre a temperatura ambient. Això li confereix la capacitat de sobrecàrrega que un motor rotatiu no podria suportar.

En aquest motor, la frenada s'aconsegueix mitjançant una simple inversió del sentit de marxa, modificant la correspondència sensor-fase.

El Bogie té unes rodes que tenen la funció de suportar el pes del vehicle amb el motor desconnectat, col·lectar l'energia elèctrica de la via i suportar parcialment el pes del vehicle en funcionament. Aquest prototip no pot ser levitat perquè es perdria la alimentació elèctrica al vehicle. Aquest contacte elèctric té l'avantatge de que la fricció i la resistència elèctrica són molt baixes per ser un contacte rodant i no relliscant com es el cas de una catenària.

2.6 Descripció del sistema de control existent al *Prototip 7*.

Tenim 2 motors lineals, cadascun amb inversors totalment independents, comandats per un microcontrolador dsPIC 30F4011, el qual analitza els senyals provinents dels sensors de posició inductius, els circuits de mesura de corrent de les bobines, la tensió d'alimentació, la temperatura dels drivers de potència i la temperatura de les bobines, per així comandar els drivers IGBT que controlen les bobines de les 5 fases del motor.

Adicionalment els inversors disposen del hardware necessari per establir comunicació via bus CAN.

El sistema de control consisteix en les següents parts:

2.6.1 Font d'alimentació.

A causa dels diversos requisits de tensions, potència, regulació i protecció; l'alimentació d'energia elèctrica es fa a través de 3 sistemes.

Font d'alimentació del riel. Aquesta és la font principal del sistema, la qual subministra una tensió de 160V, 40A en corrent contínua. Els requeriments de regulació d'aquesta font són baixos, ja que el sistema de control tolera variacions des de 60V fins 340V, sent la potència del motor l'únic paràmetre afectat.

La sortida d'aquesta font és connectada als 2 rails de la via, els quals es troben aïllats entre si.

Col·lector d'energia del vehicle. La col·lecció d'energia elèctrica del rail al vehicle es fa mitjançant 4 rodes per Bogie (motor) (figura 2.7), interconnectades per evitar pèrdues de contacte elèctric en el cas que alguna roda falli, a més de disminuir el corrent que circula per cada roda.

Les rodes van connectades a la Targeta de Potència on es connecta a la font del circuit de control i als drivers de potència.

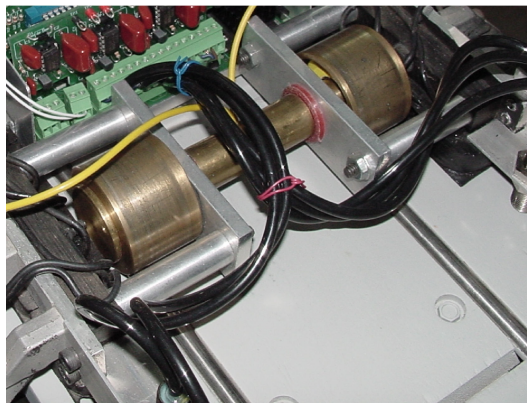


Figura 2.7: Rodes colectores d'energia.

Font del circuit de control. Consisteix en una font commutada de la marca V-Infinity [27] de 15Vdc, 15W (figura 2.8b). La tensió de 15V és necessària per a les portes IGBT i els

sensors de posició. Addicionalment s'utilitza un LM7805 per obtenir 5V per a l'alimentació del microcontrolador i la resta de l'electrònica de control.

Aquest circuit es troba inclòs a la targeta potència juntament amb els Drivers IGBT s (figura 2.14).

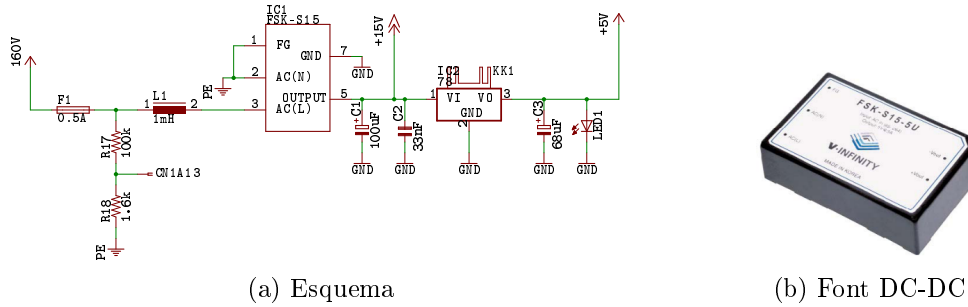


Figura 2.8: Font d'alimentació.

2.6.2 Sensors de posició.

La posició relativa del vehicle respecte al riell es mesura mitjançant 5 sensors de posició Siemens 3RG4022. Els sensors se situen en una posició tal, que sempre existeixi un detectant un nucli, que tingui una correspondència amb les bobines i en una posició que sigui simètrica per permetre desplaçaments en els 2 sentits.

Per raons d'espai, els sensors no poden posar-se un darrere l'altre, de manera que és necessari col·locar-los alternats als dos costats del vehicle, com es mostra en a la figura 2.9

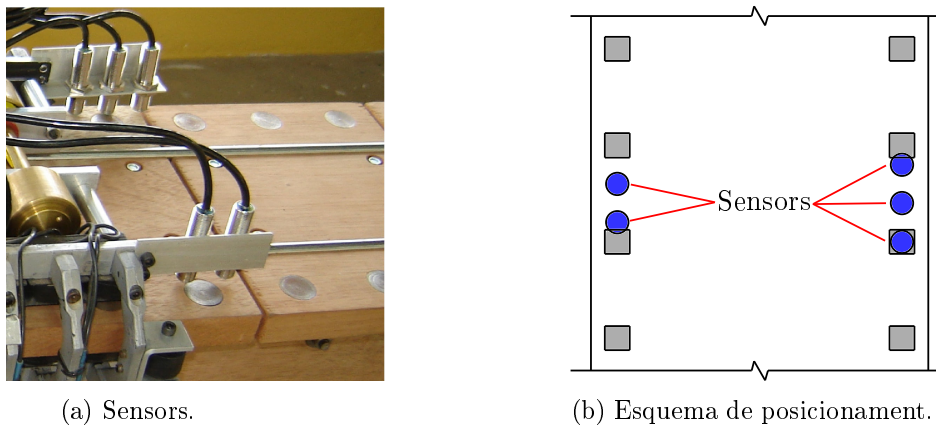


Figura 2.9: Disposició dels Sensors sobre el Motor.

2.6.3 Circuit de control.

És el principal responsable de l'òptim funcionament del vehicle. Aquí no només es prenen decisions per al sentit de marxa, control de potència i frenada, sinó que també calcula l'instant òptim de la commutació i s'analitzen les possibles falles.

Com es va esmentar anteriorment, el control central del motor és executat per un microcontrolador Microchip dsPIC30F4011 [10] [9], el qual treballa amb una configuració bàsica utilitzant únicament la memòria interna i un cristall de 6Mhz. Addicionalment s'utilitzen 2 circuits integrats més, el MCP2551 [8] i el 74HC58 [22], el primer és un transductor per a la xarxa CAN que intervé en la capa física del protocol, el segon és una comporta AND-OR dual, utilitzada per multiplexar 4 de les 5 senyals dels mesuradors de corrent, ja que només es disposa de 3 entrades de polsos.

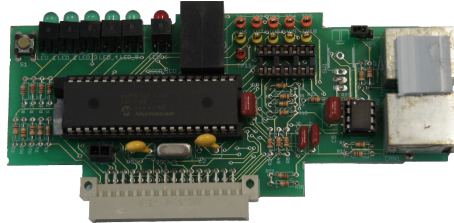


Figura 2.10: Circuit de control.

Aquesta targeta compta amb els següents dispositius d'entrada / sortida:

- Polsador de Reset.
- 5 Leds de estats de sortides (verds).
- Led d'advertència o falla (vermell).
- Connector ICSP, per a la programació del microcontrolador des d'un ordinador.
- 11 Test points, per monitoritzar els senyals de control dels Drivers de potència.
- Interruptor d'ús general, connectat a una entrada del micro. El seu ús es defineix per Software.
- Jumper per definir tal de xarxa CAN. Simplement connecta la resistència terminadora de 120Ω
- 2 connectors RJ45 per a la xarxa CAN.
- Connector d'alimentació de 5V. Només s'utilitza per alimentar la targeta en les proves.

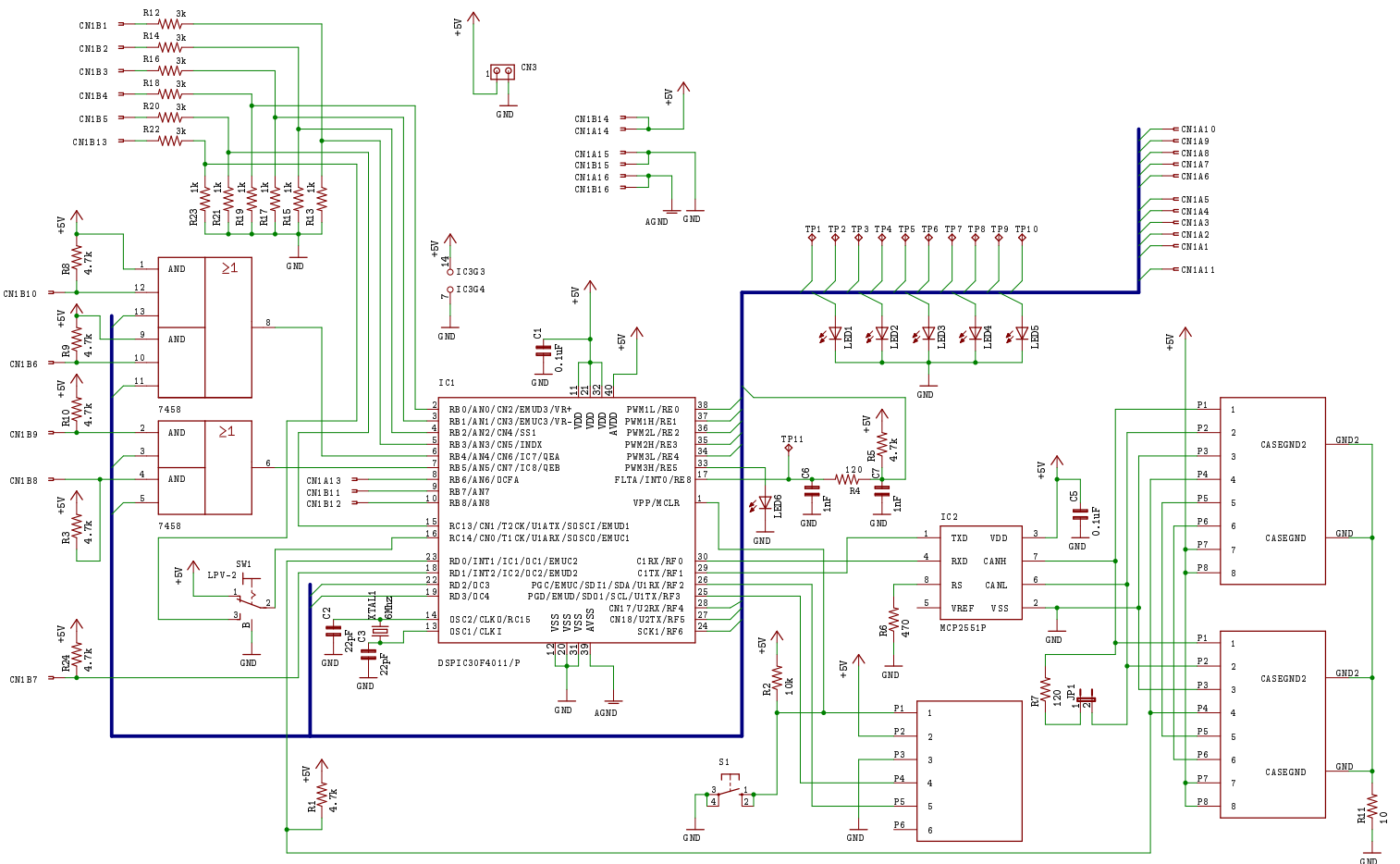


Figura 2.11: Diagrama Circuit de control

2.6.4 Mesurament del Corrent.

La funció d'aquest circuit és la de monitoritzar el corrent que circula pels electroimants de cadascuna de les fases. D'aquesta manera es poden controlar paràmetres com potència i forma d'ona.

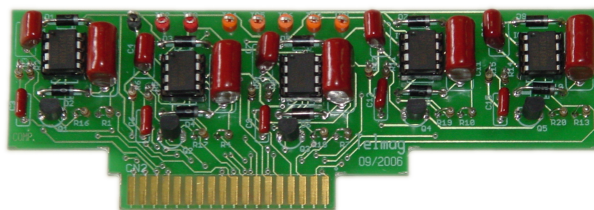


Figura 2.12: Circuit de mesura del corrent.

El nucli d'aquest circuit és el IR2175 [23], el qual és un integrat d'International Rectifier dissenyat per mesurar corrents en circuits de potència, aïllant-lo del circuit de control. La sortida d'aquest és un tren de polsos de 120Khz aproximadament, el cycle de servei està en funció del corrent mesura. Aquests trens de polsos són dirigits les entrades IC2, IC7 i IC8 del microcontrolador. Addicionalment el circuit requereix d'una resistència Shunt de 0,01Ω i 3W, situada a la Targeta de Potència en sèrie amb els connectors dels electroimants.

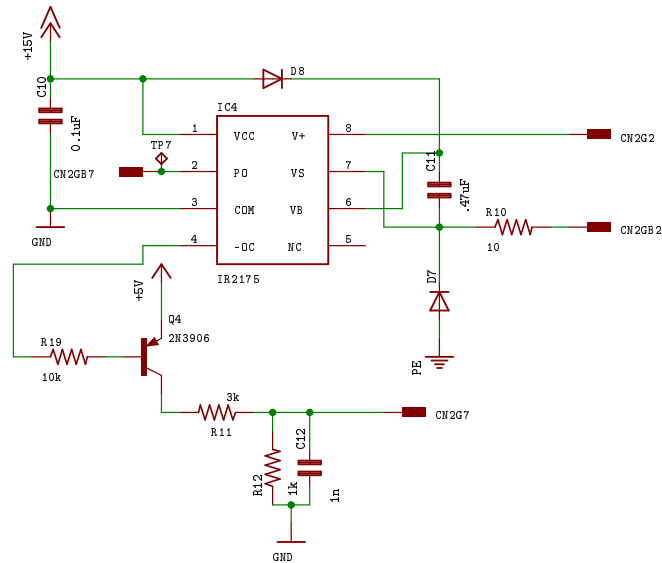


Figura 2.13: Diagrama Circuit de mesura del corrent

El circuit està dissenyat per obtenir la màxima tensió sobre la resistència Shunt de 250mV a 25A pels electroimants, per sobre d'aquest valor s'activa la protecció del circuit de mesura i envia als drivers un senyal de sobre-corrent per deshabilitar-los.

Es disposen sobre la targeta de 8 Test Points per al monitoratge de tensions i els trens de polsos.

2.6.5 Circuit de Control de Potència.

El dispositiu principal d'aquest circuit són els drivers IGBTs de Fairchild FCAS50SN60 [2] (Actualment discontinuat). On trobem condensat dins d'un mateix encapsulat 2 comportes IGBT, 2 díodes de protecció i el control de porta flotant.

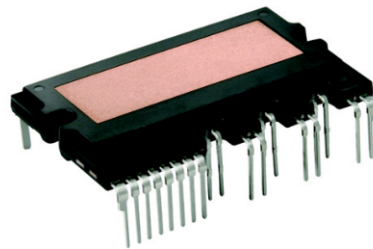


Figura 2.14: Driver IGBT Fairchild.

Aquest Driver s'alimenta directament amb els 160V del rail, addicionalment requereix 15V per als mòduls de control. Aquest integrat garanteix l'aïllament per a la protecció del circuit de control.

El circuit de Potència es troba sobre la targeta de Potència juntament amb la font d'alimentació, els connectors de la targeta de Control i Mesura de Corrent i els connectors per als

electroimants, alimentació, sensors de posició i termistor per a les bobines (figura 2.15).

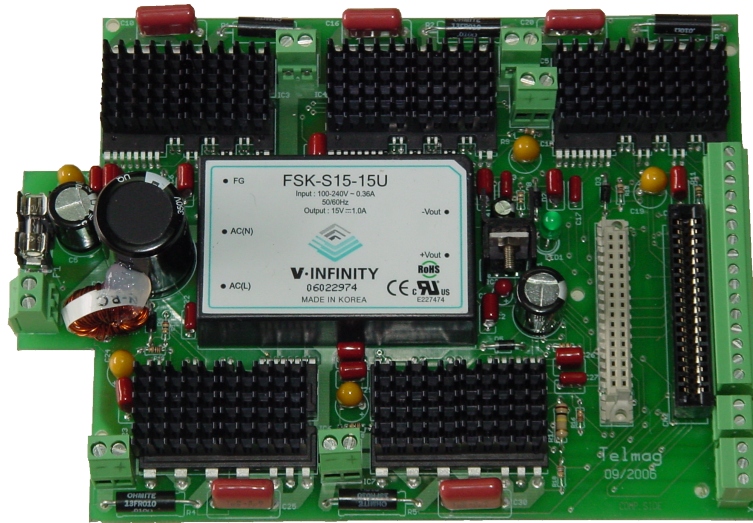


Figura 2.15: Circuit de control de potencia.

El control de cada Driver s'exerceix mitjançant 2 senyals provinents del microcontrolador. La primera és el senyal que activa la comporta inferior (Transistor del costat de 0V), la qual està activa durant tot el cicle de funcionament de la fase. L'altra senyal és la de modulació tipus PWM, s'activa simultàniament amb la primera, activant la comporta superior (Transistor del costat de 160V). Aquesta última senyal té principalment 2 funcions, la primera és mantenir una freqüència de commutació constant per al Driver d'comporta flotant (comporta superior); i la segona, per a controlar la forma i intensitat del corrent durant el cicle de funcionament de la fase.

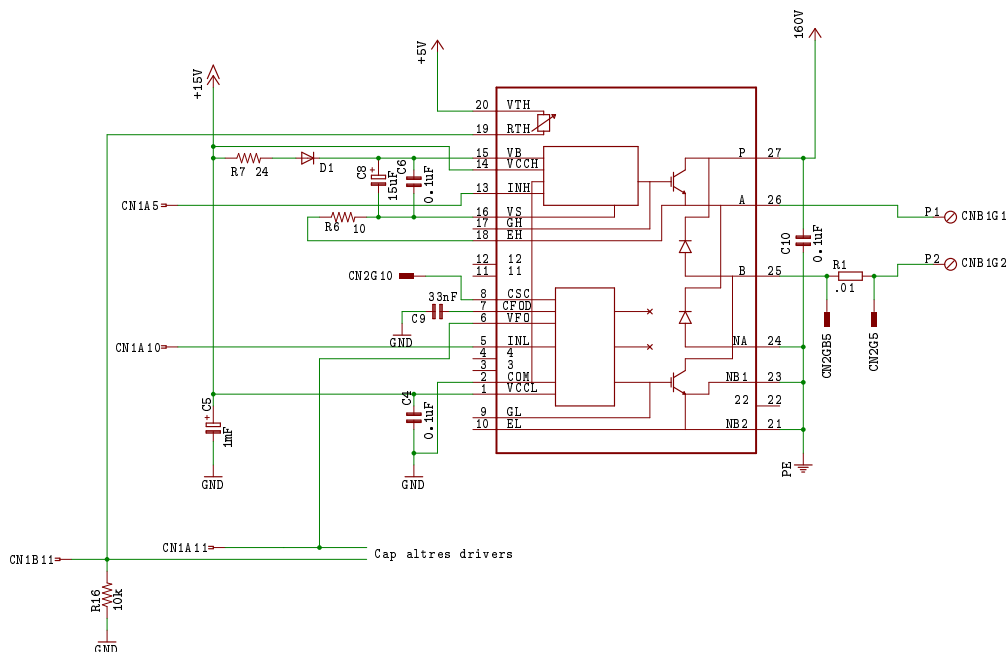


Figura 2.16: Diagrama Circuit de potencia.

2.6.6 Disposició final.

A la figura 2.17 es pot veure com queda instal·lada l'electrònica dins del motor.

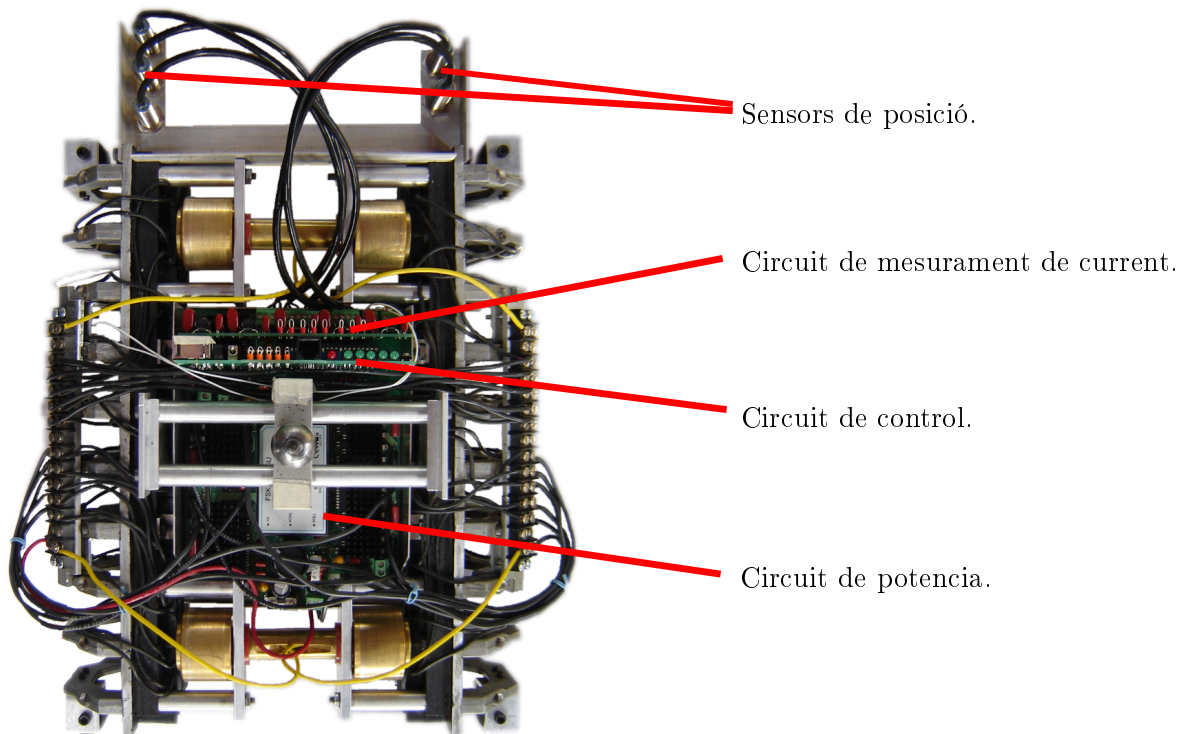


Figura 2.17: Disposició final del sistema de control.

2.6.7 Programa del microcontrolador.

El programa es va desenvolupar en Assembler amb el MPLAB IDE 7.5, i el microcontrolador es va programar amb el MPLAB ICSP 2.

Funcions del programa.

- Valida la lectura dels sensors, evitant lectures erràtiques que deteriorin al motor.
- Verifica els valors de temperatura de drivers i electroimants, voltatge d'alimentació i senyals dels sensors per permetre l'arrencada del motor.
- En cas de detectar problemes en algun dels paràmetres anteriorment esmentats o de donar-se la senyal de falla dels driver, el control desconnecta tots els electroimants.
- Mesura la velocitat de desplaçament del vehicle.
- Mesura la temperatura dels Drivers i els Electroimants.
- Mesura la tensió d'alimentació del rail.
- En funció del sentit de desplaçament desitjada el programa selecciona la configuració adequada.
- Guarda periòdicament els registres més importants en la memòria EEPROM, per a ser analitzats en qualsevol moment.
- Modula el cicle de servei del PWM incorporat al microcontrolador per regular la potència del motor.

- Desconnecta els electroimants si passen més de 2,5 segons sense que es detecti moviment del vehicle.

Descripció dels blocs del programa.

Inicialització. Realitza la configuració inicial de la majoria dels registres, les entrades i sortides, a més realitza les primeres lectures de sensors de posició, tensió i temperatura per a la verificació de les condicions d'operació i permetre l'arrencada. Guarda a la memòria EEPROM els principals registres.

Principal. És el bucle principal del programa, des d'aquí es verifiquen els canvis en els sensors de posició, la direcció de desplaçament pertinents i es desvia el programa per recollir les dades lliurades pels convertidors A/D.

Anàlisi. S'inicia només si han hagut canvis en l'estat d'algun dels sensors de posició. Valida els senyals dels sensors, mesura la velocitat del vehicle i ajusta la correspondència Sensor - Electroimant en funció de la direcció desitjada.

Sortida. Descompon el senyal de control en els diferents bits de sortida per la comporta inferior i activa la sortida corresponent del PWM per la comporta superior.

EEPROM. Subrutina que realitza l'esborrat i escriptura de les dades sobre la memòria EEPROM.

Timer2. Rutina d'interruptió encarregada d'explicar el nombre de desbordaments del Timer 2 S'utilitza per declarar saturada la mesura de velocitat i per aturar el sistema per bloqueig del motor.

Falla. Rutina que desconnecta tots els electroimants i bloqueja el programa, pot ser cridada des de qualsevol part del programa quan es detecti una falla. L'única manera de sortir d'aquesta rutina és reiniciar el processador.

Capítol 3

Desenvolupament del Hardware del *Prototip 8.*



Figura 3.1: Telmag - Prototip 8.

3.1 Riell.

El riell és una part molt important del motor lineal, ja que constitueix la mitat del motor. A més a més, és una part amb una longitud indefinida, per tant, són molt importants els estalvis en el cost de fabricació i manteniment.

Una de les millores més importants consisteix en utilitzar nuclis de acer-silici laminats. Això ha disminuït les pèrdues per corrents induïdes sense elevar de manera important el cost de fabricació.

El riell és una estructura tipus mono-riell principalment de formigó, amb els nuclis de acer-silici embeguts i una estructura de reforç no ferromagnètica en la zona propera als nuclis. És important el detall de la ubicació del reforços i el ferromagnetisme, ja que un sistema convencional basat en ferro interferiria modificant la reluctància del motor degradant el seu funcionament.

En la via a escala 1:10 hi han uns problemes addicionals. Degut que el formigó no treballa bé en petits gruixos, s'han hagut de utilitzar additius especials.

Per la construcció del riell es va fabricar un motllo de buidatge amb gran precisió en ferro. Les dimensions més importants del motllo son el gruix de la zona on es troben els nuclis perquè defineix l'entre-ferro i la separació entre nuclis.

El motllo s'ha de preparar primer amb una capa d'un oli que facilita el desemmotllatge. Després se instal·len els nuclis de acer-silici. A les figures 3.2 i 3.3 es pot veure el motllo obert amb els nuclis posicionats.



Figura 3.2: Disposició dels nuclis dins del motllo.



Figura 3.3: Motllo amb els nuclis abans de posar la tapa.

La col·locació del nuclis dins del motllo és molt important i ha de ser molt precisa i equidistant, ja que la distància entre ells defineixen els passos dels motors. Per aconseguir-ho hi han uns petits forats en el motllo per on passa un fil ferro que posiciona i lliga els elements, el fil ferro es fixat per sota amb unes bases elàstiques per absorbir les dilatacions (figura 3.4)

Després de tenir ben fixat els nuclis es posa la tapa i s'assegura per evitar que surti el formigó (figura 3.5).

Es prepara el formigó reforçat amb fibres de vidre especials i es fa el buidatge (figura 3.6). Amb la ajuda d'una taula vibradora se aconseguix que la barreja formigó-fibra arribi a tots els racons del motllo.

Passades 24 hores es desemmotlla (figura 3.7) i es comença la preparació del motllo per al



Figura 3.4: Fixació elàstica dels nuclis.

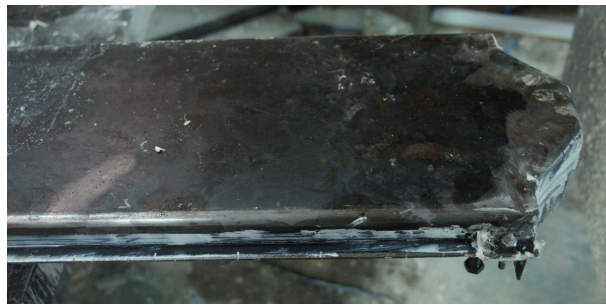


Figura 3.5: Motllo tancat.

proper segment de via. La resistència màxima se aconsegueix després de 15 dies de desemmotllat.

Es van construir 10 segments de 2,5m que fan un total de 25m de via. A la figura 3.8 es pot veure la via on es van realitzar els assaigs del nou prototip.

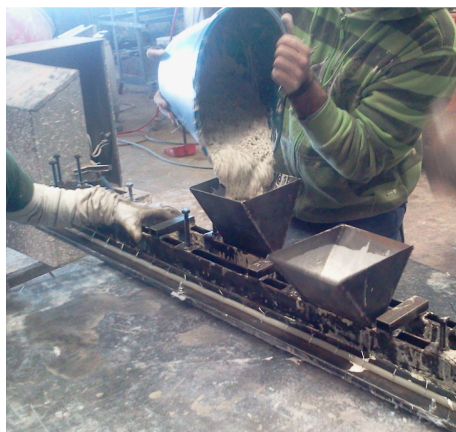


Figura 3.6: Procés de buidatge.



Figura 3.7: Riell desemmotllat.



Figura 3.8: Riell terminat.

Longitud:	250 centímetres.
Amplada:	21 centímetres.
Alçada:	9 centímetres.
Pes:	42kg.
Nombre de nuclis:	86 nuclis.
Material:	Formigó reforçat amb fibra de vidre.
Reforços addicionals:	Dues Varettes de ferro longitudinals en forma de “U” a la base.

Taula 3.1: Especificacions del riell

3.2 Bogie.

El nou Bogie incorpora una serie de millores mecàniques i elèctriques, a més hi han diverses modificacions necessàries per incloure millores del sistema de control. A continuació es descriuen les més importants.

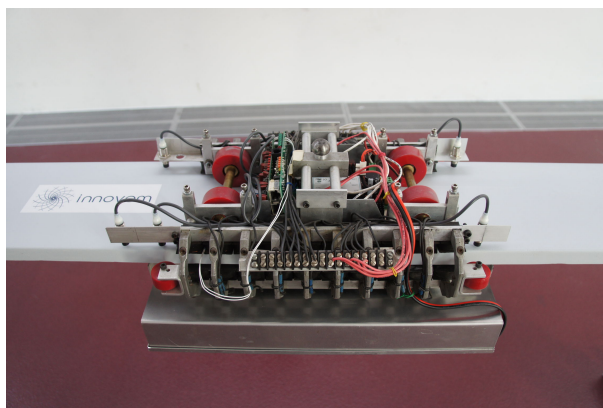


Figura 3.9: Bogie Prototip 8.

3.2.1 Instal·lació de les bateries.

El Prototip 8 és el primer model impulsat per bateries. La mida d'aquestes és important i es van situar en la part baixa del motor, la qual cosa augmenta la alçada mínima de la via però a l'hora baixa el centre de massa del vehicle, millorant el rendiment en corbes.

La bateria està conformada per cel·les de Nano-fosfat de ferro de la empresa *A123 Systems*. [25]

Tecnologia:	LiFePO4.
Voltatge de cel·la:	3,3V.
Voltatge màxim de cel·la:	3,6V.
Voltatge mínim de cel·la:	2,5V.
Nombre de cel·les:	56.
Voltatge màxim:	201,6V.
Voltatge mínim:	140V.
Capacitat:	2,5Ah.
Capacitat contínua de descarrega:	50A.
Dimensions:	26x65mm.

Taula 3.2: Característiques del sistema de bateries



Figura 3.10: Cel·la de Liti del banc de bateries.

3.2.2 Rodes.

Les noves rodes del Bogie ja no han de col·lectar l'energia de la via, per tant es simplifiquen i poden ser de un material no conductor de baixa fricció. Aquest és un tema de recerca interessant en el que se està treballant.

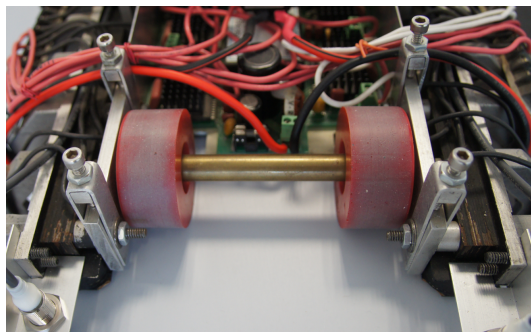


Figura 3.11: Noves rodes.

3.2.3 Sensors de posició.

Degut al canvi de nuclis massissos a nuclis laminats, els antics sensors no tenien prou sensibilitat per detectar els nuclis, s'havien de apropar a distàncies per sota l'entre-ferro del motor. El problema es degut a que aquests sensor son inductius, treballen detectant les pèrdues produïdes en un circuit inductor intern per la presència de materials inductius. Degut a que els nuclis laminats tenen unes corrents induïdes inferiors fa disminuir la sensibilitat del sensor.

Per solucionar aquest problema es van reemplaçar per sensor inductius de major distància

(més sensibles), es va triar el sensor Omron e2a-m12kn08-wp-b1 [21]. El inconvenient és que no poden estar tan aprop com els anteriors, ja que interfereixen entre ells. Per tant es van haver de modificar el posicionament, reubicant 2 sensor de l'altre costat del Bogie a la mateixa posició relativa de abans, com es pot veure a la figure 3.12.

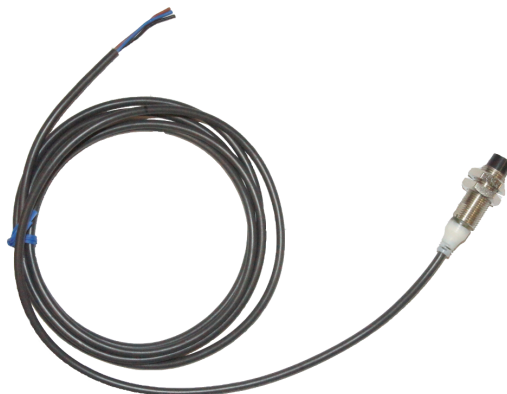


Figura 3.12: Nous sensors de posició.

3.2.4 Circuit de Control i comunicació sense fils.

La funció principal de aquest circuit es coordinar mitjançant el bus CAN el funcionament dels 2 Bogies, a més de rebre informació del seu estat. També s'ha de connectar a un dispositiu exterior mitjançant Bluetooth per enviar informació del funcionament dels motors i rebre les ordres (arrancar, parar, augmentar o baixar potencia del motor, entre altres).

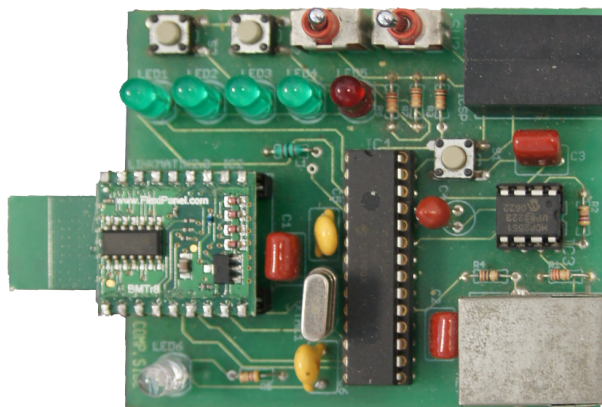


Figura 3.13: Circuit de control principal.

El component principal es un microcontrolador Microchip PIC18LF2580 [11]. En aquest processador corre el *Programa de Control Central* descrit més endavant. També hi han 6 LEDs per donar informació del funcionament del sistema, a més de 2 polsadors i 2 interruptors per configurar diverses opcions del programa.

Un altre component important es el mòdul de comunicació Bluetooth LinkMatik de l'empresa FlexiPanel [19]. Aquest mòdul es connecta via comunicació serial amb el microcontrolador per rebre ordres de configuració a més de rebre i enviar les dades de la comunicació Bluetooth. El

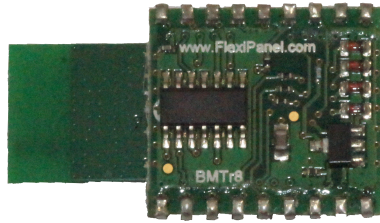


Figura 3.14: Mòdul de comunicació Bluetooth.

mòdul actua com una passarel·la transparent de comunicació, ja que tot el protocol de comunicació Bluetooth es resol pel mòdul deixant una comunicació serial entre el dispositiu extern i el microcontrolador.

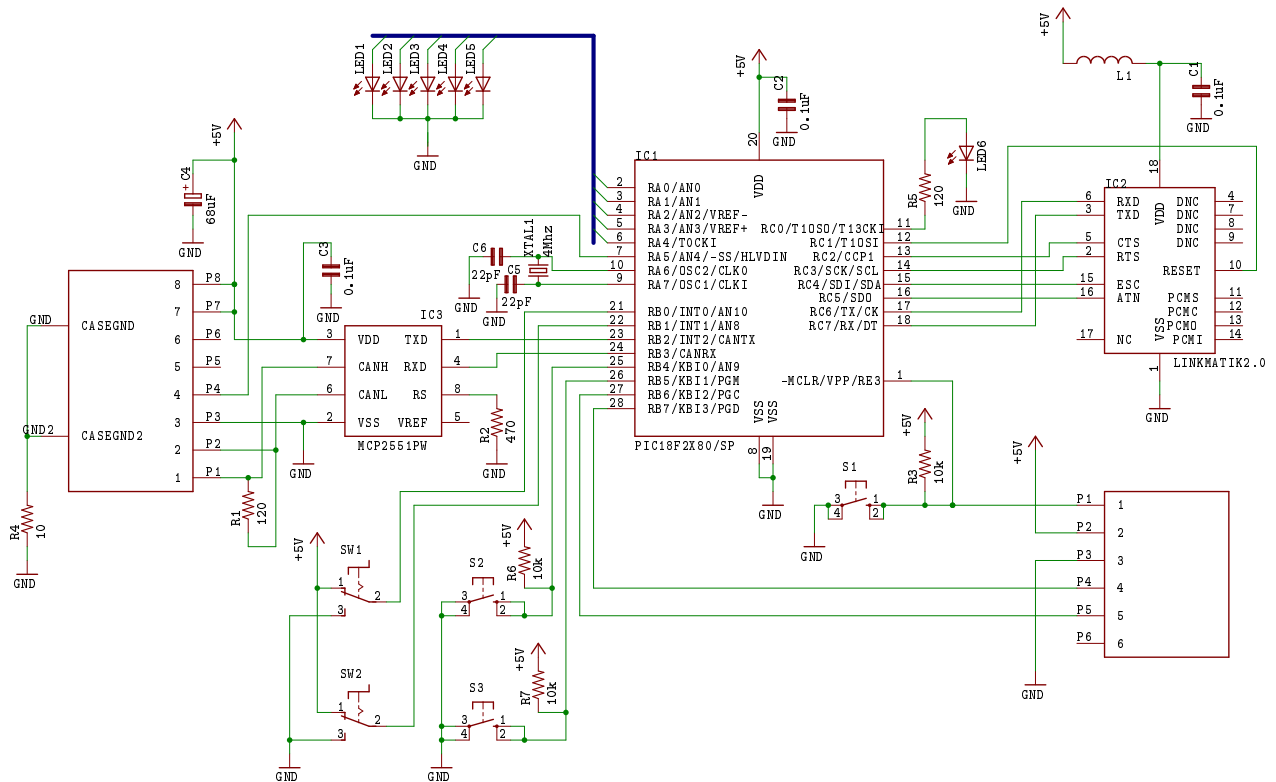


Figura 3.15: Diagrama Circuit de Control principal.

3.2.5 Disposició final.

A la figura 3.16 es pot veure com queda la nova electrònica dins dels 2 motors.

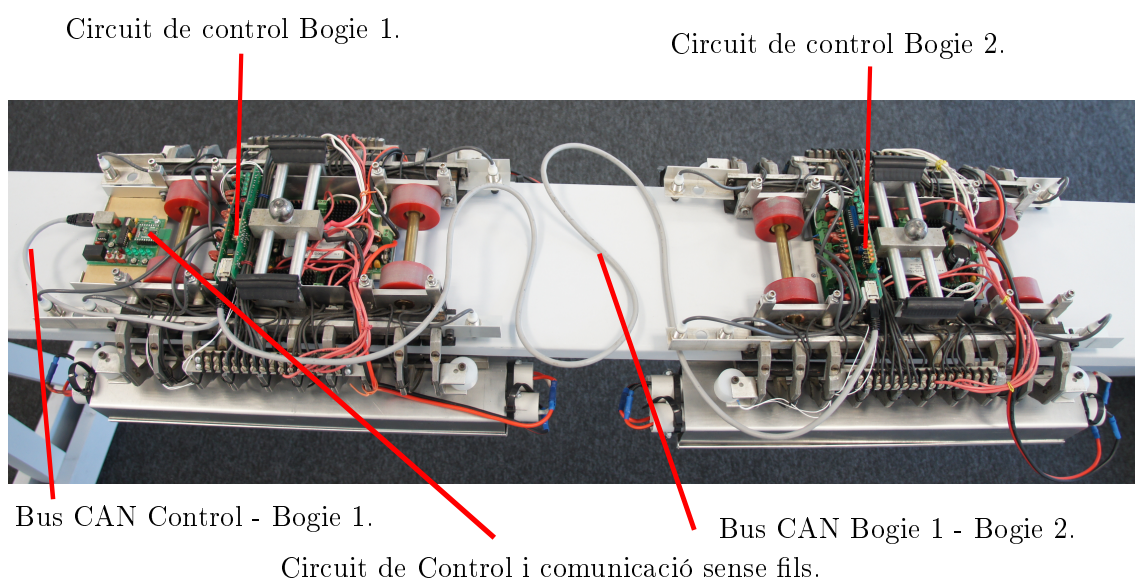


Figura 3.16: Disposició final del Prototip 8.

Capítol 4

Desenvolupament del Software del *Prototip 8.*

El Software del nou prototip consisteix en 2 programes con funcions molt distintes. El **programa dels motors** corrent dins el processador dsPIC30F4011 del circuit de control de cada motor, i el **programa de control central** corrent dins el processador PIC18LF2580 del circuit de Control i comunicació sense fils.

4.1 Programa dels motors.

Per el desenvolupament de la nova versió del Software es va reutilitzar gran part del codi del prototip anterior, principalment el referent a les sortides de control de les comportes IGBT i anàlisi dels sensors. Aquest codi estava fet en Assembler, per tant se han convertit en mòduls en Assembler del nou programa escrit en C, i compilat amb el compilador XC16 [13] del MPLAB X [12].

A continuació s'expliquen les principals parts del programa. El codi senser es por trobar a l'appendix [A](#).

4.1.1 Funcions i característiques del programa.

- Lectura i validació de sensors (d'1 a 3 sensors, seqüència lògica d'encesa).
- Activació de les comportes IGBT low.
- Configuració de PWM per activació de les comportes IGBT high.
- Lectura de tensió, temperatura comportes IGBT i temperatura motor.
- Arrencada condicionada a tensió, temperatura comportes IGBT, temperatura motor i sensors de posició.
- Detecció del sentit de marxa.
- Dos sentits de marxa.

- L'interruptor de la targeta atura el motor.
- Envia paràmetres del sistema via CAN
- WatchDog.
- Registre en EEPROM dels paràmetres del motor.
- Mesura de la velocitat (Timer 1).
- Verificació de temps màxim sense moure el motor (Timer 1).
- Recompte de nuclis (s'envia per CAN el resultat).
- Comandaments acceptats per CAN:
 - Permissiu d'arrencada.
 - Arrencada / parada.
 - Sentit de marxa.
 - Cicle de servei inicial PWM.
 - Reset.
- Verificació de timeout per a recepció de missatges CAN (Timer 2).
- Enviament periòdic de missatges via CAN (Timer 4).
- Funció LED vermell:
 - Tot esperant permissiu d'arrencada.
 - Aturada per baixa bateria, falla bus CAN o motor aturat.
 - Reset per falla del processador (intermitent).
- Parada del motor en cas de:
 - Error de lectura en sensors.
 - Falla de recepció CAN (Timer 2).
 - Falla de enviament CAN (Timer 4).
 - Molt baixa bateria.
 - Interruptor de control.
 - Comando CAN.
 - temperatura de comportes IGBT o debanats.
 - Motor bloquejat.
 - Reset per WatchDog o qualsevol altra falla que reiniciï el processador.

4.1.2 Algoritme de detecció de falles.

Una de les millores del programa és la implementació d'un algoritme per la detecció de falles del sistema. Principalment problemes de comunicació i de hardware.

Validació de sensors. El programa abans de donar el “vistiplau” o permisiu per engegar el motor i durant tot el funcionament, valida constantment el senyal dels sensors de posició per que compleixin les següents condicions:

- No pot haver menys de un sensor activat.
- No pot haver més de 2 sensors activats.
- Quan se engega un sensor ho ha de fer en funció del sensor que esta a punt de desconnectar-se en la seqüència correcta com en veu a la taula 4.1.

Sensor que s'activa	Sensor activat (marxa endavant)	Sensor activat (marxa enrere)
1	4	3
2	5	4
3	1	5
4	2	1
5	3	2

Taula 4.1: Seqüència de connexió dels sensors

Baixa bateria. Per protecció de les bateries de Liti, el programa desconnecta el motor si la tensió de les bateries s'acosta al valor crític.

Temperatura del motor i les comportes IGBT. Per donar el permisiu de engegar el motor i durant tot el funcionament, el programa verifica que els valor de temperatura dels debanats del motor i de les comportes IGBT sigui correcte.

WatchDog. El processador te habilitat el WatchDog per protegir el sistema de problemes que inhabilitin el processador, en cas de reinicialitzar el processador per qualsevol problema, el programa para el motor i envia la falla via CAN.

Motor bloquejat. El programa verifica que el motor este en moviment, ja que en cas de quedar-se bloquejat hi ha el perill de sobre escalfar els debanats del motor.

Falla de recepció CAN. El programa verifica que es rebin missatges periòdicament, si el temporitzador (Timer 2) desborda, vol dir que s'ha excedit el temps recepció, la qual cosa fa que el programa desconnecti el motor.

Falla de enviament CAN. El motor envia missatges periòdicament, si quan el processador intenta enviar un missatge i el buffer encara està ocupat amb el darrer missatge el programa desconnecta el motor.

4.1.3 Anàlisi de velocitat i sentit de marxa.

L'anàlisi de velocitat i sentit de marxa es fa dins del cicle principal del programa anomenat “Ciclo” (diagrama 3, pàgina 57), una rutina anomenada “Calc_Veloc” (diagrama 10, pàgina 73).

una rutina anomenada “Análisis” (diagrama 8, pàgina 69) i les petites rutines “Adelante” (diagrama 11, pàgina 75) i “Atras” (diagrama 12, pàgina 77). Les dues primeres rutines estan codificades en C, i les últimes està en Assembler. Aquestes es criden cada cop que hi ha un canvi en la entrada dels sensors.

El programa està normalment dins d’un bucle infinit dins el programa “Ciclo”. Quan el mòdul “Input Change” del microcontrolador detecta un canvi en qualsevol de les 5 entrades dels sensors se inicia una rutina que el primer que fa es cridar la rutina “Análisis”. Aquesta rutina primer llegeix els sensors, després analitza que hi hagin 1 o 2 sensors actius, qualsevol altre condició es falsa i surt amb la bandera de “error en sensors”. Després analitza si se ha activat un sensor, això vol dir que hi han 2 sensors actius i per tant entrem en una petita lògica d’anàlisi per veure qui és el altre sensor actiu, això ens dona directament informació del sentit de desplaçament del motor com ho especifica la taula 4.1 (pàgina 31). Si els sensors actius no corresponen a cap seqüència lògica, el algoritme surt amb la bandera de “error de sensors”.

De tornada a la rutina dins el cicle principal, s’analitza si s’ha activat el sensor 1, per sumar o restar en funció del sentit del motor el recontador del nombre de nuclis, de aquesta manera es té una ubicació molt precisa de la posició del motor a la via.

Finalment es compara la direcció en la que es desplaça el vehicle amb la direcció a la que es vol que hi vagi, per definir quina relació “sensor-fase” es farà servir en funció si es desitge frenar o accelerar, ja que per a frenar el vehicle es fa servir una inversió de la marxa del motor, com és el cas de la majoria dels motors elèctrics. Finalment es tria la rutina “Adelante” o “Atras” en funció del sentit desitjat. La rutina “Adelante” genera una sortida igual a la entrada dels sensors, es a dir, per exemple el *sensor 1* activa la *fase 1*. En canvi la rutina “Atras” modifica la relació rotant un bit cap a la dreta, en aquest cas el *sensor 1* activa la *fase 5*. A la figura 4.1 es pot veure que si s’energisa la fase “A” actuarà sobre els nuclis marcats en blau, si s’energisa la fase “E” actuarà sobre els nuclis marcats en vermell.

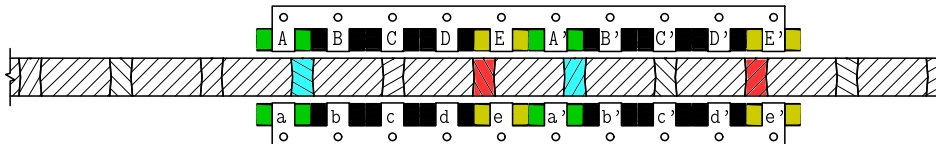


Figura 4.1: Sentit de desplaçament amb la bobina A o la E.

La lògica de comparar el sentit real amb el desitjat sembla una mica redundant, i en realitat ho es en aquest cas, però esta feta pensant en les futures versions del programa en les que hauran relacions “sensor-fase” en funció de la velocitat. Ja que degut a la inductància de les bobines, el temps de reacció a major velocitat es important i requereix connectar-les i desconnectar-les amb un avanç que varia en funció de la velocitat. Es el mateix cas dels cotxes de benzina, que el instant al que la bugia fa la espurna esta en funció de la velocitat de rotació del motor. Degut a que el temps de ignició es considerable a altes velocitats, la espurna ha de saltar abans de que el pistó arribi al punt mort superior.

4.1.4 Xarxa CAN.

El dsPIC30F4011 té un mòdul CAN [10] que administra tot el protocol del estàndard de comunicació i la capa física amb l’ajuda del MCP2551 [8].

Els missatges s'envien amb una freqüència de 2ms durant la fase inicial del programa abans del permíssiu del controlador central, i durant el funcionament normal del motor la seqüència baixa a 2,8s. En versions futures s'espera poder enviar dades de la corrent de les bobines a gran velocitat pel bus CAN.

Estructura dels missatges.

Identificació. Per a la identificació del missatge es fa servir un numero de 11 bits configurat de la següent manera:

ID: I I N N N N T T M M M

Nom	Bit	Descripció	Opcions
I	9-10	Identificació de qui envia	11 Controlador 10 Bogie 01 Bateria
N	5-8	Numero del dispositiu que envia. En cas de que envii el controlador, es a qui va destinat	1111 destinat a tothom
T	3-4	Tipus de missatge	01 velocitat normal 1x alta velocitat
M	0-2	Numero del missatge (Quan el missatge es divideix en diversos grups)	

Taula 4.2: Identificador de missatge.

Dades a enviar. Les dades que envia el programa del motor es troben dins de 7 registres de 16 bits, els quals son enviats en grups de 4. Durant la fase inicial del programa mentre s'espera el permíssiu del controlador central, només s'envien 4 registres, ja que els altres només tenen sentit durant el funcionament del motor.

Per exemple, durant les diferents fases de funcionament s'enviarien els registres com es mostra a la taula 4.3.

Fase del programa	Registres	Identificador
Inicial	<i>flags, Volt, TempDriv, TempBob</i>	ID: 10 nnnn 01 001
Funcionament normal	<i>flags, Volt, TempDriv, TempBob</i>	ID: 10 nnnn 01 001
	<i>CICLPWM, CNuclis, Veloc</i>	ID: 10 nnnn 01 010

Taula 4.3: Dades enviades pel motors via bus CAN.

Càlcul del temps. El càlcul del temps i configurar els regis de control del mòdul CAN del dsPIC30F4011 es realitza amb el següent càlcul com ho especifica la seva documentació. [16] [10]

Freqüència cristall:

$$Xtal = 6MHz$$

Configuració del oscil·lador:

$$FPR = PLL (x4)$$

Internal instruction cycle clock:

$$Fcy = Xtal/4 * FPR = 6MHz$$

Freqüència de comunicació del bus:

$$Fbaud = 250Kbps$$

El bit CANCKS esta deshabilitat, per tant la freqüència del rellotge CAN es 4 vegades la del sistema

$$(Fcan = 4Fcy)$$

Nombre de *Times Quanta* per bit:

$$K = 16$$

Valor dels *Time Quanta*:

$$Tq = (1/Fbaud)/K = (1/250000)/16 = 250ns$$

Càlcul de *Baud Rate Prescaler*:

$$BRP = (Tq * CANCKS * Fcy/2) - 1 = (250x10^{-9} * 4 * 6 * 10^6/2) - 1 = 2$$

Filtres i màscares En el programa s'han configurat independentment pel Bogie 1 amb els filtres i màscares de la taula 4.4, i amb els filtres i màscares de la taula 4.5. La configuració esta pensada per a deixar espai per altres opcions com ara el administrador de bateries, el qual es una de las properes millores del sistema.

Tipus	Numero	Valor	Descripció
Màscares	0	11 0001 11 000	Dades des del controlador central
	1	11 0001 00 000	Dades des de la bateria
Filtres	0	11 0001 01 000	Dades provinents del controlador central

Taula 4.4: Màscares i filtres del mòdul CAN del Bogie 1.

Tipus	Numero	Valor	Descripció
Màscares	0	11 0010 11 000	Dades des del controlador central
	1	11 0010 00 000	Dades des de la bateria
Filtres	0	11 0010 01 000	Dades provinents del controlador central

Taula 4.5: Màscares i filtres del mòdul CAN del Bogie 2.

Buffer	Descripció
Buffer 0	Dades provinents del controlador central
Buffer 1	Dades provinents de les bateries

Taula 4.6: Buffers d'entrada dsPIC30F4011.

4.2 Programa de control central.

Aquest programa és la primera versió, ja que no s'hi havia fet abans cap controlador central ni enviament de dades a l'exterior. Esta escrit en C, i compilat amb el compilador XC8 [14] del MPLAB X [12].

A continuació s'expliquen les principals parts del programa. El codi sencer es pot trobar a l'apèndix B.

4.2.1 Funcions i característiques del programa.

- Rep l'estat de 2 Bogies via CAN.
- Pot desactivar un d'ells.
- Quan als 2 Bogies passen la prova de diagnostic, se'ls envia mitjançant CAN:
 - Permissiu d'arrencada.
 - Sentit de marxa.
 - Cicle de servei inicial PWM.
- Calcula mitjana el nombre de nuclis rebut dels Bogies per controlar longitud del trajecte.
- Calcula mitjana de velocitat rebuda dels Bogies.
- Enviament periòdic de missatges via CAN (Timer 0).
- Atura els motors en cas de:
 - Pèrdua de la connexió Bluetooth.
 - Falla de comunicació CAN.
 - Reinicialització sobtada d'un dels motors.
 - Bateria molt baixa.
 - Motor bloquejat.
 - Interruptor de control local
 - Interruptor de control dels Bogies
 - Ordre d'aturada via Bluetooth.
 - Després d'executar-se un predeterminat nombre de cicles de recorregut.
 - Diferència en el recompte de nuclis entre els Bogies.

- Inici del programa per comandament via Bluetooth.
- Enviament dels paràmetres de tots dos Bogies via Bluetooth sota demanda (fins i tot abans d'arrencar).
- Control del cicle del PWM
- Reinicialitza microcontroladors (Controlador i Bogies) per comandament de Bluetooth.
- Ordres Bluetooth:
 - T: Inicia programa.
 - 1: Dades Bogie 1.
 - 2: Dades Bogie 2.
 - s: Aturar.
 - a: Arrencar.
 - d: Canviar Direcció.
 - q: PWM = 10
 - w: PWM = 20
 - i: PWM = 40
 - t: PWM = 60
 - r: Reset.
- Funció dels interruptors:
 - SW1: aturada manual.
 - SW2: -
 - S2: Bypass Bogie 2.
 - S3: Bypass Bogie 1.
- Funció dels LEDs:
 - LED1: Bogie 1 (fix: OK; intermitent: Bypass).
 - LED2: Bogie 2 (fix: OK; intermitent: Bypass).
 - LED3: aturada per reinicialització de Bogie.
 - LED4: Enviament missatge (CAN)
 - LED5: Indicació de aturada. (fix: Inicialització; intermitent: Reset)
 - LED6: Connexió Bluetooth.
- Detecció de la causa de reinicialització:
 - Brown-out Reset.
 - Watchdog Time-out.

4.2.2 Algoritme de detecció de falles.

Una de les funcions del *Control central* no només és detectar el seus problemes, també a de rebre els problemes detectat pels altres dispositius i prendre mesures.

Administració de les falles detectades pels Bogies. El *Control central* rep les falles detectades per qualsevol Bogie i genera la ordre de parada general, per demanar-li al a Bogie que no té la falla parar també. Una millora a futur es demanar-li al Bogie (o la resta de Bogies en cas de que hi hagin més) frenar el vehicle de manera segura.

WatchDog. El processador te habilitat el WatchDog per protegir el sistema de problemes que inhabilitin el processador, en cas de reinicialitzar el processador per qualsevol problema, el programa deixarà d'enviar informació via CAN i per tant els motors pararien per falla de comunicació.

Falla de comunicació Bluetooth. El mòdul Bluetooth esta constantment connectat amb el dispositiu extern i reporta el estat d'aquesta connexió. Si aquesta connexió es perd, el programa envia la ordre de aturada als Bogies via CAN.

Error de recompte de nuclis o càlcul de velocitat. El programa compara les dades de recompte de nuclis i velocitat de cada Bogie, si troba una diferència considerable envia la ordre de aturada.

4.2.3 Càlcul de velocitat i ubicació sobre la via.

El programa calcula la mitjana de velocitat per tenir informació de la velocitat del vehicle que serà de molta utilitat per als projectes futurs. També calcula la posició relativa del vehicle per definir uns límits en la via i canviar el sentit de marxa del vehicle, evitant que surti de la via.

4.2.4 Xarxa CAN.

El PIC18LF2580 té un mòdul *Enhanced Controller Area Network* (ECAN) [11] que administra tot el protocol del estàndard de comunicació i per a la capa física fa servir també el MCP2551 [8].

Els missatges s'envien amb una freqüència mínima de 1,4s, a menys que hi hagi una nova ordre per enviar, aquesta se envia el més aviat possible.

Estructura dels missatges.

Identificació. Per a la identificació del missatge es fa servir la mateixa estructura explicada per als Bogies de la taula 4.2 a la pàgina 33.

Dades a enviar. Les dades que envia el *control central* son més simples que les que envien els Bogies. Consisteixen en 3 registres de 8 bits, els quals no requereixen ser fraccionats com el cas dels Bogies. El flux de dades des de el *control central* es molt més baix que les dades des de els motors.

A la taula 4.7 es pot veure els registres i el identificador que son enviats. Aquest identificador fa que el missatge sigui acceptat per tots dos Bogies. Aquesta estructura esta

dissenyada per a les optimitzacions futures, on els missatges podran ser enviats a un Bogie en particular o fins i tot per els futurs BMSs (Battery management system) de les bateries dels Bogies.

Fase del programa	Registres	Identificador
Inicial i Funcionament normal	<i>flags, temporal, ContPWM</i>	ID: 11 1111 01 001

Taula 4.7: Dades enviades pel controlador central via bus CAN.

Càlcul del temps. El càlcul del temps i configurar els regis de control del mòdul ECAN del PIC18LF2580 es realitza amb el següent càlcul com ho especifica la seva documentació. [16] [11]

La configuració de aquest mòdul es diferent a la del mòdul CAN del dsPIC30F4011. Per tant se ha buscat la manera de fer-ho el més semblant possible per disminuir els problemes que puguin sortir per una falta de sincronisme entre els mòduls.

Freqüència cristall:

$$Xtal = 6MHz$$

Configuració del oscil·lador:

$$OSC = HSPLL (x4)$$

Internal instruction cycle clock:

$$Fosc = Xtal * OSC = 24MHz$$

Freqüència de comunicació del bus:

$$Fbaud = 250Kbps$$

Nombre de *Times Quanta* per bit:

$$K = 16$$

Valor dels *Time Quanta*:

$$Tq = (1/Fbaud)/K = (1/250000)/16 = 250ns$$

Càlcul de *Baud Rate Prescaler*:

$$BRP = (Tq * Fosc/2) - 1 = (250x10^{-9} * 24 * 10^6/2) - 1 = 2$$

Filtres i màscares En el programa s'han configurat els filtres i màscares de la taula 4.8.

Tipus	Numero	Valor	Descripció
Màscares	0	11 0000 10 000	
	1	11 0000 10 000	
Filtres	0	10 0000 10 000	Dades des del Bogie. Alta velocitat
	1	01 0000 10 000	Dades des de la bateria. Alta velocitat
	2	01 0000 10 000	Dades des del Bogie. Baixa velocitat
	3	01 0000 10 000	Dades des de la bateria. Baixa velocitat

Taula 4.8: Màscares i filtres del mòdul ECAN del PIC18LF2580.

Buffer	Descripció
Buffer 0	Dades de alta velocitat
Buffer 1	Dades de baixa velocitat

Taula 4.9: Buffers d'entrada PIC18LF2580.

4.2.5 Comunicació Bluetooth.

La comunicació Bluetooth es realitza mitjançant el mòdul LinkMatik. [19] La configuració, enviament i recepció de dades entre el microcontrolador i el mòdul Bluetooth es fa via serial asincrònica, amb el mòdul *Enhanced Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter* (EUSART) del PIC18LF2580. [11] Aquest mòdul es configura per a una comunicació asincrònica de 9600bps.

Freqüència cristall:

$$Xtal = 6MHz$$

Configuració del oscil·lador:

$$OSC = HSPLL (x4)$$

Internal instruction cycle clock:

$$Fosc = Xtal * OSC = 24MHz$$

Freqüència de comunicació del bus:

$$Fbaud = 9600bps$$

Valor dels *Bits de configuració*:

$$BRGH = 1 \text{ (High speed)}$$

$BRG16 = 0$ (8-bit Baud Rate Generator)

Càlcul de *Baud Rate Register*:

$$SPBRG = ((F_{osc}/F_{baud})/16) - 1 = 155$$

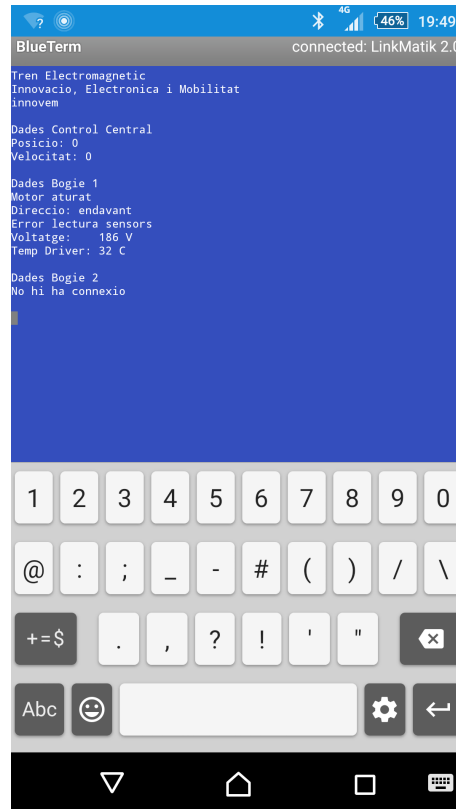


Figura 4.2: Comunicació des de dispositiu mòbil amb la aplicació Blueterm.

Capítol 5

Conclusions

Durant les proves realitzades al sistema, amb un i dos bogies, la comunicació CAN va treballar de manera satisfactòria. Tot i que les plaques i els cables estan sotmesos a fortes induccions electromagnètiques i amb molt poques barreres de protecció. No van haver evidències de falles de comunicació, i la única manera de produir-ne una era desconnectant un cable, la qual cosa només afectava la comunicació entre els nodes pròxims, deixant encara operatius els nodes restants.

Per primera vegada es van poder aconseguir en temps real paràmetres de funcionament del motor, ja que pràcticament es impossible mesurar paràmetres amb el motor en funcionament, a causa de la naturalesa del motor lineal, no es pot posar en funcionament de manera estàtica, i s'hauria d'anar darrera del motor fent les mesures. El sistema ha quedat amb prou capacitat per millorar les mesures i obtindre més paràmetres.

Un altra avantatge de la que ara es disposa és la capacitat de controlar el motor a distància. Ara es molt més important, ja que abans es controlava connectant i desconnectant la energia del riell, i fins i tot es feien canvis de polaritat per controlar el sentit de marxa del vehicle.

En conclusió, aquestes millores han sigut molt profitoses pel prototip, i es continuaran desenvolupant i millorant el sistema de control basat en aquesta arquitectura.

Capítol 6

Projectes a Futur.

Com s'ha comentat als diversos capítols de aquest treball, això es una feina que ha iniciat amb un prototip amb molts anys de desenvolupament i encara hi han moltes coses per fer. Molts de aquests projectes i altres en l'àrea mecànica ja estan en desenvolupament amb la participació dels departaments d'electrònica i mecànica del TecnoCampus Mataró. Entre les mes importants de l'àrea de control tenim.

Administrador de bateries. Les bateries de liti son molt delicades tant per el proces de càrrega com el de descàrrega, i es necessari un sistema que verifique la tensió de cada cel·la i les mantingui dins d'un llindar de tensió màxima i mínima.

Control de corrent del motor. Actualment es modula el corrent amb el PWM sense mesurar el corrent per les bobines, el qual es molt variable, a més a més, la gran inductància fa que la connexió de les fases sigui molt lenta. En quest moments hi ha un estudiant del Tecnocampus fent-ho com Treball de Final de Carrera.

Mesurament en temps real del corrent de fase. A més de la mesura dels paràmetres, es requerix un esforç adicional del Bus CAN i el bluetooth per disposar de les dades en temps real. Aquest projecte permetrà analitzar millor el comportament del motor optimitzar el seu funcionament.

Aplicació en ordenador o mòbil per al control del vehicle i anàlisi de les dades. Esta molt lligat amb el projecte anterior, es requereix una aplicació que faciliti el control i la visualització de les dades. Actualment es treballa en una simple terminal.

Parada segura del vehicle. Actualment el sistema quan detecta una falla, desconnecta els motors, deixant el vehicle en moviment a la via. El sistema hauria de analitzar les dispositius sense falla i aturar el vehicle.

Bibliografía

- [1] Peter Aitken and Bradley Jones. *Aprendiendo C en 21 Dias*. Pearson Educación, 1994.
- [2] Fairchild Semiconductor Corporation. *FCAS50SN60 Smart Power Module for SRM. Data Sheet*, 2005.
- [3] Dan Gookin. *C for dummies*. Wiley Publishing Inc, 2004.
- [4] Dogan Ibrahim. *Advanced PIC Microcontroller Projects in C*. Newnes, 2008.
- [5] Caio Gübel (Microchip Technology Inc.). *Comparing CAN and ECAN Modules*, 2004.
- [6] Jatinder Gharoo (Microchip Technology Inc.). *ECANTM Operation with DMA on dsPIC33F and PIC24H Devices*, 2009.
- [7] Keith Pazul (Microchip Technology Inc.). *Controller Area Network (CAN) Basics*, 1999.
- [8] Microchip Technology Inc. *MCP2551 High-Speed CAN Transceiver. Data Sheet*, 2003.
- [9] Microchip Technology Inc. *dsPIC30F4011/4012 Data Sheet*, 2005.
- [10] Microchip Technology Inc. *dsPIC30F Family Reference Manual*, 2006.
- [11] Microchip Technology Inc. *PIC18F2480/2580/4480/4580 Data Sheet*, 2006.
- [12] Microchip Technology Inc. *MPLAB X IDE User's Guide*, 2011.
- [13] Microchip Technology Inc. *MPLAB XC16 C Compiler User's Guide*, 2012.
- [14] Microchip Technology Inc. *MPLAB XC8 C Compiler User's Guide*, 2012.
- [15] Mike Stanczyk (Microchip Technology Inc.). *Smart Sensor CAN Node Using the MCP2515 and PIC16F876*, 2010.
- [16] Pat Richards (Microchip Technology Inc.). *Understanding Microchip's CAN Module Bit Timing*, 2001.
- [17] Lucio Di Jasio. *Programming 16-Bit PIC Microcontrollers in C*. Newnes, 2007.
- [18] R. Krishnan. *Switched Reluctance Motor Drives*. CRC Press, 2001.
- [19] FlexiPanel Ltd. *LinkMatik 2.0 Data Sheet*, July 2007.
- [20] David Meiklejohn. Introduction to PIC Programming. Programming Mid-Range PICs in C. www.gooligum.com.au.

- [21] Omron. *Cylindrical Proximity Sensor E2A*, 2012.
- [22] Philips. *74HC58. Data Sheet*, December 1990.
- [23] International Rectifier. *IR2175 Linear current sensing IC. Data Sheet*, June 2004.
- [24] Ramon Serra. Controlador de Velocidad para Tren Electromagnético. Trabajo de final de carrera para obtener el título de Ingeniero Electricista, March 2000.
- [25] A123 Systems. *Nanophosphate High Power Lithium Ion Cell*, 2012.
- [26] W. H. Taylor. Taylor's Electro-magnetic Engine. *The Mechanic's Magazine, Museum, Register, Journal and Gazette*, 32:693–696, 1840.
- [27] LLC V-Infinity. *FSK-S15 Series AC-DC Converter. Data Sheet*, July 2006.
- [28] Wikipedia. Linear motor. http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_motor, 2015.
- [29] Wikipedia. Reluctance motor. http://en.wikipedia.org/wiki/Reluctance_motor, 2015.