

Escola Universitària Politécnica de Mataró

Centre adscrit a:



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA**

Grau en enginyeria electrònica i automàtica industrial

DISSENY D'UN LONGBOARD PROPULSAT PER UN MOTOR BRUSHLESS I AMB RECUPERACIÓ D'ENERGIA

Memòria

**MARCEL RUSCALLEDA ORFILA
PONENT: FRANCESC GIMENEZ**

PRIMAVERA 2015



**TecnoCampus
Mataró-Maresme**

Agraïments

Agrair el recolzament que he rebut per part de la meva família i també l'ajuda que he rebut d'alguns professors de forma desinteressada

Resum

Aquest projecte aporta els conceptes necessaris per dissenyar i construir gairebé totes les parts d'un longboard elèctric propulsat per un motor Brushless DC i amb recuperació d'energia en els desnivells. Es documenten els fonaments teòrics per dimensionar i escollir el motor BLDC i la bateria depenent de les necessitats, per dissenyar i escollir els components del circuit electrònic de potència i el de control, també dóna una idea de com s'han d'acoblar les diferents parts mecàniques que conformen el conjunt de la solució.

Resumen

Este proyecto aporta los conceptos necesarios para diseñar y construir casi todas las partes de un longboard eléctrico propulsado por un motor Brushless DC y con recuperación de energía en los desniveles. Se documentan los fundamentos teóricos para dimensionar y escoger el motor BLDC i la batería dependiendo de las necesidades, para diseñar i escoger los componentes del circuito electrónico de potencia y el de control, también da una idea de cómo ensamblar las diferentes partes mecánicas que conforman el conjunto de la solución.

Abstract

This project provides the necessary concepts for design and builds almost all parts of the electric longboard propelled by a Brushless DC machine with energy recovery in the downhill. The theoretical fundamentals are documented for sizing and choosing of the Brushless DC machine and the battery depending to the requirements, for designing and choosing the components of the power and control electronic circuits, also it gives an idea of how should be assembled the different mechanical components of the whole solution.

Índex.

Índex de figures.....	III
Índex de taules.....	V
Glossari de termes.....	VII
1. Objectius.....	1
1.1. Propòsit.....	1
1.2. Finalitat.....	1
1.3. Objecte.....	1
1.4. Abast.....	2
2. Fonaments teòrics.....	3
2.1. El Longboard.....	3
2.2. El Longboard elèctric.....	4
2.3. Motors d'imants permanents.....	5
2.3.1. Motor Brushless DC.....	6
2.4. Driver de potència.....	8
2.5. Control PWM.....	9
2.6. Sensors d'efecte Hall en motors BLDC.....	10
2.7. Bateries elèctriques.....	11
2.7.1. Bateries de Ió-Liti.....	12
2.8. Frenada regenerativa.....	12
3. Motor Brushless DC.....	15
3.1. Càlcul de les necessitats.....	16
3.1.1. Velocitat requerida.....	17
3.1.2. Parell requerit.....	17
3.2. Selecció del motor.....	23
3.3. Transmissió de potència amb reductor simple.....	24
3.4. Intensitat dependent de la carrega.....	26
3.4.1. Intensitat consumida dependent de la càrrega.....	26

3.4.1. Intensitat generada depenent de la càrrega.....	26
4. Bateria	29
5. Control del motor BLDC	35
5.1. Tècniques de control.	35
5.1.1. Control trapezoïdal.....	36
5.1.2. Control Sinusoïdal.....	36
5.1.3. Control vectorial.....	37
5.2. El convertidor estàtic.....	38
5.3. Driver del inversor.....	39
5.4. Microcontrolador.....	39
6. Selecció dels components electrònics.	41
6.1. Transistors.	41
6.2. Driver del inversor.....	42
6.3. Microcontrolador.....	42
7. Implementació i simulació.	45
7.1. Implementació dels components electrònics i de potència.....	45
7.2. Simulació de l'electrònica de potència.....	47
8. Disseny general en Solidworks.	51
8.1. Longboard en 3D.....	51
8.2. Simulació de la rigidesa.	52
9. Especificacions tècniques.....	55
10. Desviació de la planificació.	57
11. Desviació del pressupost.	59
12. Referències.....	63

Índex de figures.

Figura 2.1. Diferents formes de longboard	3
Figura 2.2. Classificació dels motors d'imants permanents. [12]	5
Figura 2.2. Motor Brushless DC de tres fases amb un parell de pols magnètics. [13].....	7
Figura 2.3. Secció d'un motor Brushless amb sensors. [2]	7
Figura 2.4. Font de commutació 1. [10].....	8
Figura 2.4. Font de commutació 2. [10].....	9
Figura 2.5. Modulació PWM al PSIM.	10
Figura 2.6. Pauta d'excitació 120 graus i ona de corrent de U. [14]	10
Figura 2.7. Exemple de detecció del pol magnètic amb sensors Hall. [14]	11
Figura 2.8. Perfil del consum d'un tren entre dues estacions.[16]	13
Figura 4.1. Diagrama sòlid lliure d'un sòlid en un pla inclinat	17
Figura 4.2. Motor Brushless DC de Alien Power System.....	23
Figura 4.3. Corretja dentada trapezoïdal	24
Figura 4.1. Cel·la de la bateria seleccionada.....	31
Figura 4.2. Temps de descarrega de la bateria seleccionada.....	33
Figura 5.1. Forma d'ona elèctrica per fases i commutació dels bobinats. [13]	36
Figura 5.2. Valors de funcionament dels diferents tipus de transistors.	38
Figura 5.3. Commutació PWM dels transistors. [13].....	40
Figura 6.1. Mosfet IRL40B215	41
Figura 6.2. Diagrama de blocs del sistema electrònic.	43
Figura 7.1. Circuit de potència i control PSIM.	46
Figura 7.2. Circuit d'alimentació de l'electrònica de control PSIM.	46
Figura 7.3. Circuit per a la simulació PSIM.....	47
Figura 7.4. Simulació sense càrrega.....	48
Figura 7.5. Simulació amb una càrrega de -0,4 Nm.....	48
Figura 7.6. Simulació amb una càrrega de 0,8 Nm.	49
Figura 8.1. Vista superior 3D del longboard.....	51

Figura 8.2. Vista inferior 3D del longboard.	52
Figura8.3. Ancoratges i forces de la simulació.	53
Figura 8.4. Simulació de l'estrès.	53
Figura 8.5. Simulació del desplaçament.	54
Figura 10.1. Diagrama de Gantt del projecte.	57

Índex de taules.

Taula 2.1. Comparativa entre BLDC i PMSM.....	6
Taula 3.1. Forces de propulsió.	22
Taula 3.2. Acceleració en diferents pendents.....	22
Taula 3.3. Força a contrarestar per mantenir la velocitat constant.....	22
Taula 5.1. Relació de commutació entre els sensors Hall i els transistors	39
Taula 9.1. Comparativa especificacions tècniques.....	55
Taula 11.1. Costos d'inversió inicials.	59
Taula 11.1. Costos d'enginyeria.....	60
Taula 11.2. Amortitzacions.	61
Taula 11.3. Cost del Prototip.....	61
Taula 11.4. Costos d'inversió finals.....	62

Glossari de termes.

abc	Sistema de referència estacionari
α	Angle entre l'eix 'x' i l'eix giratori a velocitat ω
CD	Compact Disc
EUPMT	Escola Universitària Politècnica de Mataró
m	massa
PWM	Modulació de l'ample de pols (<i>Pulse Width Modulation</i>)
TFC	Treball Final de Carrera
ω	Velocitat de gir de l'eix giratori
BLDC	Brushless Direct Current
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
EMF	Força electromotriu
a	Acceleració

1. Objectius.

1.1. Propòsit.

Estudiar i dimensionar els principals components, circuits i mètodes de control necessaris per construir un longboard amb un motor Brushless DC incorporat, que permeti tant propulsar el vehicle com mantenir la velocitat i recuperar energia en les baixades.

1.2. Finalitat.

La finalitat és estudiar el conjunt dels components i mètodes de funcionament necessaris així com la forma en la que funciona l'electrònica per combinar la propulsió i la generació d'energia en el vehicle, dimensionar els components per tal de fer-ho possible i fer algunes simulacions per comprovar que la solució reuneix els paràmetres i condicions de funcionament estipulats. També es vol donar una idea de com s'acoblen els components mecànics i electrònics a un longboard convencional.

1.3. Objecte.

L'objecte del projecte és l'estudi dels components que conformen un longboard propulsat per un motor Brushless, que permeti tant propulsar el vehicle com mantenir la velocitat i recuperar energia en les baixades, reduint els riscos en el descens de pendents pronunciades i allargant l'autonomia de la bateria.

L'objectiu és obtenir un manual que permeti efectuar els càlcul de les principals especificacions del motor Brushless, de les principals característiques de la bateria i que permeti entendre el sistema de la recuperació d'energia mitjançant el control de la velocitat en el descens de pendents.

1.4. Abast.

L'abast del projecte és arribar a obtenir una solució que permeti construir un longboard propulsat per un motor Brushless amb capacitat per mantenir una velocitat constant en pendents mitjançant un mètode de recuperació d'energia.

Les tasques a realitzar per a assolir el disseny són les següents:

- Càlcul de les principals especificacions i característiques del motor Brushless DC per tal que s'adeqüi a les necessitats del vehicle. En aquest apartat s'ha de definir el parell i la velocitat màxima del motor, per poder afrontar així pendents i avançar a la velocitat seleccionada des del comandament.
- Càlcul de les principals especificacions de la bateria. En aquest apartat s'haurà de dimensionar la bateria, és a dir, calcular quina és la capacitat de la bateria en Ah per tenir una autonomia determinada sabent quina és la intensitat màxima de descarrega.
- Estudi de l'electrònica de potència necessària per a utilitzar el motor Brushless DC com a generador. En aquest apartat s'haurà de definir quins són els components necessaris per fer aquesta funció, tenint en compte les especificacions requerides.
- Estudi del sistema de recuperació d'energia per controlar la velocitat i mantenir-la constant. En aquest apartat s'haurà d'estudiar de quina manera es pot controlar la velocitat del vehicle en un pendent i com recuperar energia al fer-ho.
- Disseny en solidworks o autocad d'algun component del longboard.

2. Fonaments teòrics.

En aquest apartat apareixen els conceptes que s'han de saber per poder entendre l'essència del projecte i poder comprendre algunes tècniques que s'utilitzen per a assolir la solució final.

2.1. El Longboard.

El longboard o taula llarga és un esport que es va posar de moda entre els anys 1960 i 1980, però per parlar d'història primer s'ha de tenir en compte que és una modalitat del skateboard.

La primera versió del skateboard s'anomenava "sidewalk surfing" i va ser creat per surfistes impacients en èpoques on no hi havia onades surfejables. El "sidewalk surfing" era una taula de fusta en la qual s'enganxaven els eixos dels seus patines amb l'objectiu d'obtenir una sensació similar a la d'una taula de surf. Va ser l'any 1959 quan es van començar a comercialitzar els primers skateboards, però els primers productes eren molt perillosos i les vendes van quedar estancades.

La primera gran separació entre surf i skateboard va ser aproximadament l'any 1977 quan els primers skaters realitzaven els primers trucs aeris. Durant la època dels 1990 va haver-ho el principal "boom" d'aquest esport gracies a skaters com Tony Hawk, i a partir d'aquest moment van anar sorgint diferents modalitats com "carving, cruising i downhill", cadascuna d'elles necessitava una taula diferent.



Figura 2.1. Diferents formes de longboard

Les diferents principals modalitats de longboarding són les següents:

- Carving: és un estil on es patina fent girs de banda a banda de la carretera, és similar al moviment que es fa l'snowboard.
- Downhill: consta d'agafar la màxima velocitat en un pendent pronunciat, es pot arribar als 125 Km/h.
- Sliding: és una tècnica de frenada, consisteix en derrapar per controlar la velocitat.
- Cruising: no és una altre cosa que utilitzar el longboard com a mitjà de transport.
- Pool: és un estil on es patina a l'interior de piscines buides.

2.2. El Longboard elèctric.

Hi ha diferents marques de longobards elèctrics, però encara no hi ha una excessiva competència. Un tret característic de totes aquestes marques és que els seus dissenys són exclusivament de mobilitat urbana, és a dir, utilitzen el mètode de frenada regenerativa exclusivament com a fre. Algunes d'aquestes marques són Ride Marbel i Boosted boards i ofereixen longobards elèctrics amb les següents característiques:

- Preu: 900\$ - 1500\$
- Potència: 1000W - 2000W
- Velocitat màxima sense pendent: 40 km/h
- Autonomia màxima: 19km
- Pes: 5Kg - 7Kg

També existeixen algunes marques que dissenyen sistemes per adaptar un motor elèctric a un longboard normal, però les prestacions d'aquests sistemes són bastant pobres degut a les seves excessives pèrdues.

En quant al mercat del longboard elèctric, no hi ha cap marca ni companyia que enfoqui la frenada regenerativa com un sistema de seguretat per no arribar a altes velocitats quan el desnivell és bastant pronunciat, cosa que facilitaria la ubicació en el mercat del sector.

2.3. Motors d'imants permanents

Dins dels motors elèctrics hi ha diferents tipus de motors d'imants permanents. Aquí tenim una petita il·lustració de la classificació d'aquests motors tant específics:

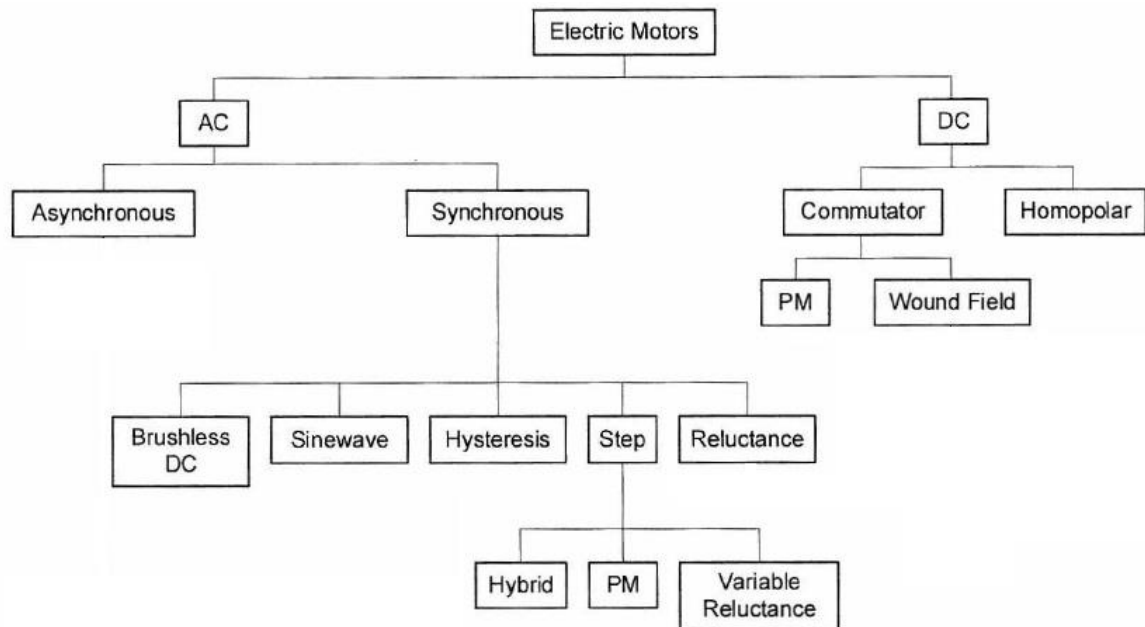


Figura 2.2. Classificació dels motors d'imants permanents. [12]

Com es pot veure en la Figura 2.2. hi ha tres tipus de motors elèctrics d'imants permanents:

- Brushless DC
- PM synchronous
- PM step motor

Tots ells són motors elèctrics sense escobretes, i el seu principi de funcionament és essencialment idèntic, però s'utilitzen per a aplicacions diferents. Dins dels motors Brushless síncrones, hi podem trobar el motor BLDC i el motor PMSM, que tenen el mateix tipus de construcció, però la diferència entre ells és el tipus control que requereixen.

El motor Brushless DC és un motor AC controlat de forma trapezoïdal, és a dir, es connecten cada una de les fases per separat a un pont inversor trifàsic i s'alimenta cadascuna de les tres fases amb corrent continu, tot això combinat amb una commutació electrònica adequada s'aconsegueix que només les dues fases corresponents depenent de la situació del motor estiguin excitées.

El motor PMSM té el mateix tipus de control però és un motor que funciona amb un senyal sinusoidal. Per tant, la força electromotriu resultant també és de tipus sinusoidal.

Comparació entre el motor BLDC i el motor PMSM	
BLDC	PMSM
Màquina síncrona	Màquina síncrona
Alimentat amb dc	Alimentat amb senyal sinusoidal
EMF trapezoïdal	EMF Sinusoidal
Commutació de la posició del flux de l'estator cada 60°	Variació contínua de la posició del flux de l'estator
Només dos fases ON al mateix temps	Possibilitat de tenir tres fases ON al mateix temps
Ondulació del parell en les commutacions	No hi ha ondulació del parell
Altes pèrdues al nucli degut als harmònics	Menys harmònics degut a la excitació sinusoidal
Menys pèrdues de commutació	Més pèrdues de commutació
Algorisme de control relativament simple	Algorisme de control matemàticament intens

Taula 2.1. Comparativa entre BLDC i PMSM

2.3.1. Motor Brushless DC.

El motor Brushless DC, com el seu nom indica, és un motor sense escobretes, anells o commutador mecànic, que si són requerits en motors de corrent continu convencionals o en màquines síncrones de corrent altern per la connexió amb els debanats del rotor.

Aquest tipus de motor es va desenvolupar a la dècada del 1960 per ser aplicat a l'enginyeria aeroespacial, que tenia problemes de interferències en les comunicacions aire-terra degut a la commutació de les corrents de les bobines del induït dels motors de corrent continu convencionals, que originava radiacions electromagnètiques en el col·lector de delgues.

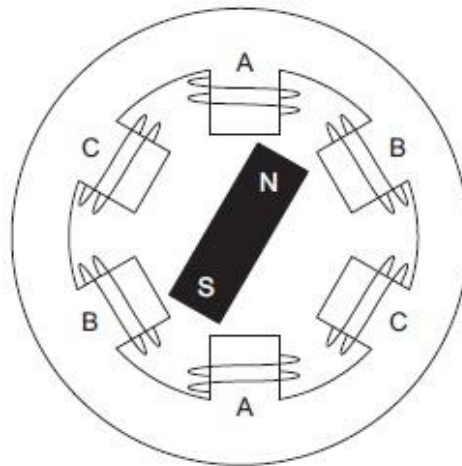


Figura 2.2. Motor Brushless DC de tres fases amb un parell de pols magnètics. [13]

El motor de corrent continu sense escobretes [2] té una disposició diferent a l'habitual, és a dir, l'inductor està en el rotor i no té bobinats polars per evitar l'ús d'anells lliscants per l'excitació dels mateixos, sinó que els pols estan formats per uns imants permanents i amb una estructura de pols cilíndrics llisos. L'induït està en l'estator, per aquest motiu no té col·lector de delgues, i les commutacions de corrent es realitzen en les bobines del induït es realitzen mitjançant l'ajuda d'interruptors electrònics. Habitualment el nombre de bobines es limita a tres, per no tenir un nombre d'interruptors electrònics molt elevat. Amb aquest tipus de motor es redueix el consum ja que no s'ha d'excitar el bobinat de camp i s'incrementa l'efectivitat de l'entreferro ja que els imants permanents tenen una permeabilitat quasi igual a la de l'aire.

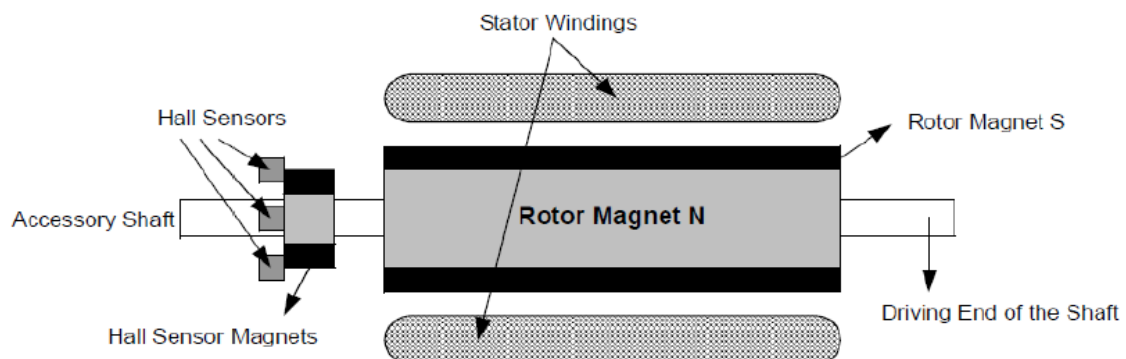


Figura 2.3. Secció d'un motor Brushless amb sensors. [2]

Una de les peculiaritats del motor Brushless és el sistema de detecció de la posició del rotor ja que utilitza sensors específics perquè les commutacions electròniques és realitzin just en el moment precís. Aquests sensors són de tipus Hall.

2.4. Driver de potència.

Convertidor DC-DC bidireccional:

Un bon antecedent per estudiar el driver de control necessari seria l'estudi realitzat sobre un automòbil que funciona amb energia solar [10], accionat per un motor Brushless DC i utilitzant el concepte de frenada regenerativa. L'esquema general utilitzat com a circuit de càrrega de la bateria es mostra en la figura 2.3. per una topologia d'un interruptor actiu i en la figura 2.4. per a una topologia de dos interruptors actius.

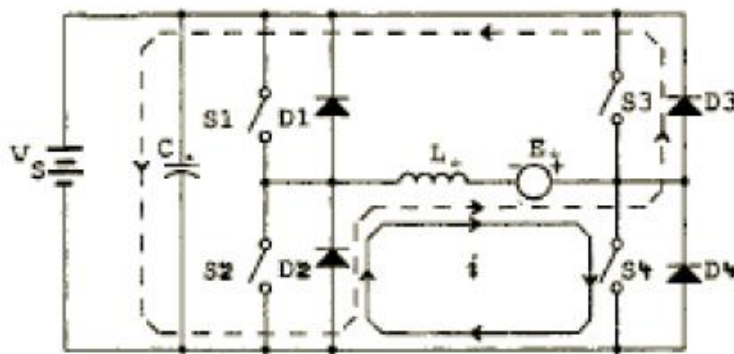


Figura 2.4. Font de commutació 1. [10]

En el circuit de la figura 2.3 es mostra la línia contínua com el camí del corrent, en l'estat inicial, quan l'interruptor 4 està encès i la línia puntejada com el camí del corrent quan l'interruptor 4 està apagat. L'interruptor 4 s'apaga quan el corrent arriba a un límit definit, carregant la bateria. Quan es redueix el corrent que circula cap a la bateria, l'interruptor 4 es torna a encendre, repetint el procés quan s'està frenant.

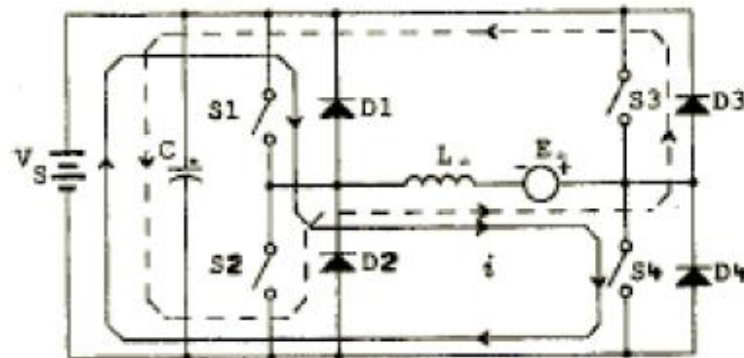


Figura 2.4. Font de commutació 2. [10]

En la Fig. 2.4 es reflexa el camí del corrent amb la línia contínua, generada per la fem induïda als bobinats. Quan s'arriba a un llinar estable, s'apaguen els interruptors 1 i 4, creant un camí de corrent seguit per la línia puntejada.

2.5. Control PWM.

La modulació per ample de polsos d'una senyal o font d'energia és una tècnica en la que es modifica el cicle de treball d'una senyal periòdica per controlar la quantitat d'energia que s'envia a la càrrega.

La construcció típica d'un circuit PWM es porta a terme mitjançant un comparador amb dues entrades i una sortida. Les dues senyals d'entrada han de ser de diferent forma. En l'actualitat hi ha moltes aplicacions que utilitzen aquesta tècnica i existeixen circuits integrats en els que s'implementa la modulació PWM.

En quant als motors, la modulació per ample de polsos és una tècnica que s'utilitza per modular la velocitat de gir dels motors elèctrics d'inducció o asíncrons. Manté el parell motor constatat i no suposa un despilfarrament d'energia elèctrica. Com el seu nom indica, controla l'alimentació en un moment alt o un moment baix, controlat normalment per MOSFETS o tiristors.



Figura 2.5. Modulació PWM al PSIM.

Com es pot veure a la Fig. 2.5. Modulació PWM, l'amplada del tren de polsos varia, com més estret és en la part superior, més accelera el motor.

2.6. Sensors d'efecte Hall en motors BLDC.

Mode d'excitació a 120°:

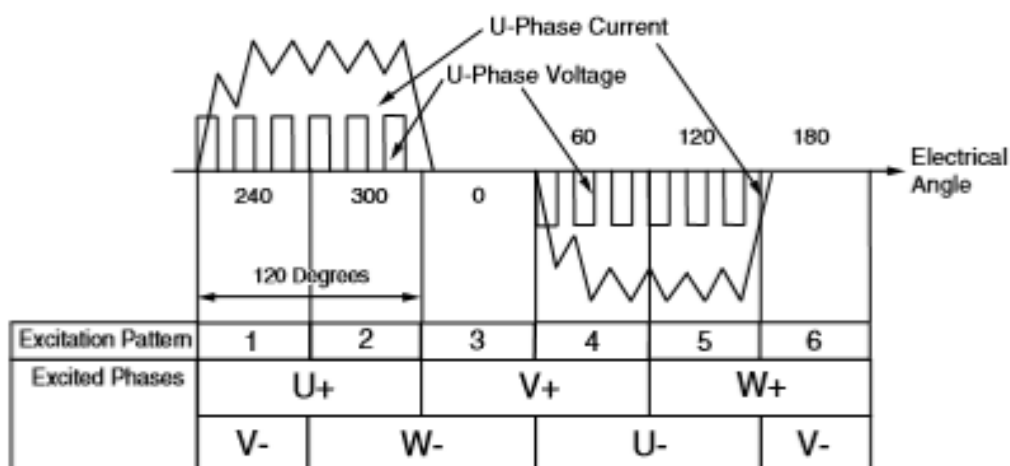


Figura 2.6. Pauta d'excitació 120 graus i ona de corrent de U. [14]

Per accionar el motor BLDC, la tensió del bus de contínua ha de conduir per dos fases de l'estator en un moment donat mitjançant l'activació de un transistor superior i un d'inferior per 60 graus elèctrics. Per a un pont de sis elements, hi ha sis configuracions de commutació possibles:

- U+/V-, U+/W-, V+/W-, V+/U-, W+/U-, W+/V-

El motor BLDC gira 360 graus elèctrics quan les sis configuracions de commutació han canviat seqüencialment a intervals de 60 graus en sincronització amb la posició del rotor. Després de completar el sisè pas, la seqüència es repeteix. Aquest mètode és denominat com el mètode d'excitació a 120 graus perquè cada element de commutació s'encén i s'apaga cada 120 graus elèctrics.

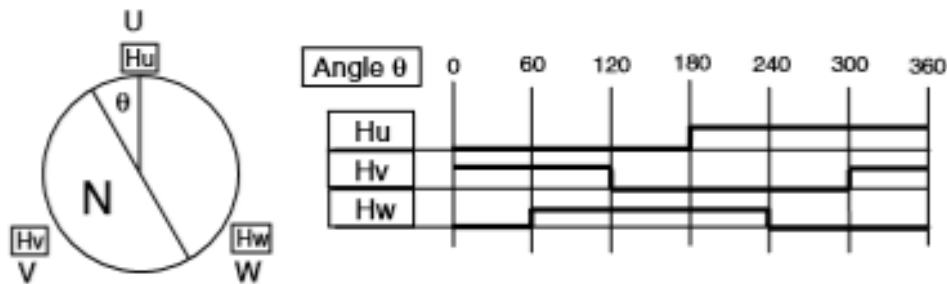


Figura 2.7. Exemple de detecció del pol magnètic amb sensors Hall. [14]

2.7. Bateries elèctriques.

És denomina bateria, bateria elèctrica, acumulador elèctric o acumulador, al dispositiu que conté una o més cel·les electroquímiques que poden convertir la energia química emmagatzemada en electricitat. Cada cel·la consta d'un elèctrode positiu o ànode, d'un elèctrode negatiu o càtode i electròlits que permeten que els ions es moguin entre els elèctrodes, permetent així que el corrent flueixi fora de la bateria. Les bateries han anat evolucionant amb el temps, actualment n'hi ha de molts tipus, aquests en són alguns:

- Plom: Aquest tipus de bateries són econòmiques i fiables, però bastant pesades. Per aquest motiu gairebé no s'utilitzen en petits vehicles. Tenen una duració de 2 anys o 500 cicles.
- Ni-Mh: Són més lleugeres que les de plom, però són molt delicades i tenen efecte memòria. Han quedat en desús amb l'aparició de les noves bateries de Liti.
- Liti: Són les bateries més utilitzades avui en dia, són més petites i lleugeres que les de plom i les de Ni-Mh. No tenen efecte memòria i són més ecològiques que les que contenen plom o níquel. Tenen un preu elevat.
- Ió Liti: Tenen la capacitat d'emmagatzemar una quantitat d'energia considerable en relació al seu pes i tenen una vida útil d'uns 1000 cicles. Per altra banda, són delicades en quant a cops i descarregues molt ràpides.

- Liti-Polímer (LiPo): És la segona generació de bateries de Liti. Solucionen l'inconvenient de la delicadesa als cops i accepten descarregues molt altres sense perill de pèrdua de Liti.
- Liti – ferros (LiFe): Són la última generació. Tenen un cicle de vida de 3000 cicles i no tenen cap risc d fuga o explosió. Poden subministrar fins al doble de la seva capacitat nominal durant un curt espai de temps.
- Liti – titanat (LiTiO): Aquest tipus de bateria és de càrrega ràpida. Toshiba te una bateria anomenada SuperSharge Ion Battery (SCiB) que està dissenyada per oferir un 90% de la capacitat de càrrega en només 10 minuts.

2.7.1. Bateries de Ió-Liti

Les bateries de liti es componen de cèl·lules utilitzen components de liti intercalats com els materials positius i els negatius. Com a bateria, els ions de liti salten entre els elèctrodes positius i negatius. El material de l'elèctrode positiu és habitualment un òxid metàl·lic amb una estructura en capes, com ara l'òxid de cobalt de liti (LiCoO_2), o d'un material amb una estructura com l'òxid de manganès i liti (LiMn_2O_4). El material de l'elèctrode negatiu és habitualment un carboni grafit, també és un material a capes. En el procés de càrrega i descàrrega, els ions de liti s'insereixen o s'extrauen d'un espai intersticial entre les capes atòmiques dins del materials actius. [15]

2.8. Frenada regenerativa.

La frenada regenerativa o sistema de recuperació d'energia cinètica és un fre dinàmic que permet reduir la velocitat d'un vehicle i emmagatzemar energia al fer-ho. Aquests dispositius es basen en un motor elèctric que pot ser utilitzat també com a generador elèctric, convertint l'energia cinètica del vehicle en energia elèctrica gràcies al parell resistent del motor. Es pot reutilitzar aquesta energia elèctrica al moment o emmagatzemar-la a una bateria. Aquest sistema s'utilitza de diferent manera en diferents sectors:

- Automoció: Mitjançant la utilització d'aquest tipus de sistemes tant en vehicles elèctrics com híbrids, utilitzant el motor elèctric per a frenar, es carreguen les bateries. Aquesta energia es pot utilitzar en l'arrancada, els sistemes auxiliars o per

propulsar el vehicle quan aquest funciona en mode elèctric. A la formula 1 es va començar a utilitzar l'any 2009.

- Transport ferroviari: En aquest sector, l'aprofitament és molt més elevat, principalment per dos motius. Les grans masses dels trens i en molts casos les seves altes velocitats, fan que l'energia cinètica que es pot recuperar amb sistemes de frenada sigui molt més elevat. Per una altre banda, al ser sistemes de transport connectats a la xarxa, l'energia que no sigui aprofitada a bord dels trens es pot exportar a la xarxa elèctrica.

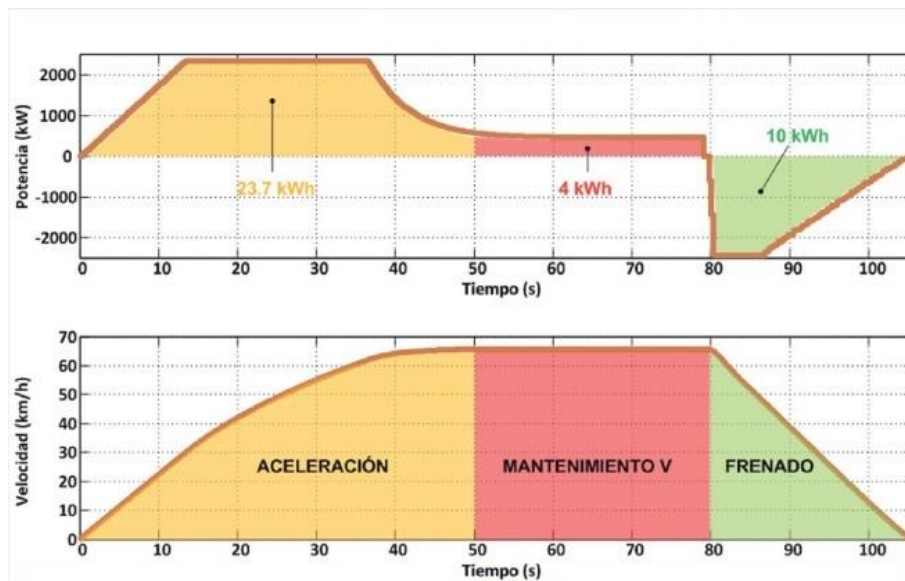


Figura 2.8. Perfil del consum d'un tren entre dues estacions.[16]

3. Motor Brushless DC.

En aquest apartat s'estudia quines són les necessitats de parell i velocitat per tal de definir les característiques i necessitats del motor a seleccionar. Les principals característiques que s'ha de tenir en compte per dimensionar aquest tipus de motor són la força electromotriu i el parell.

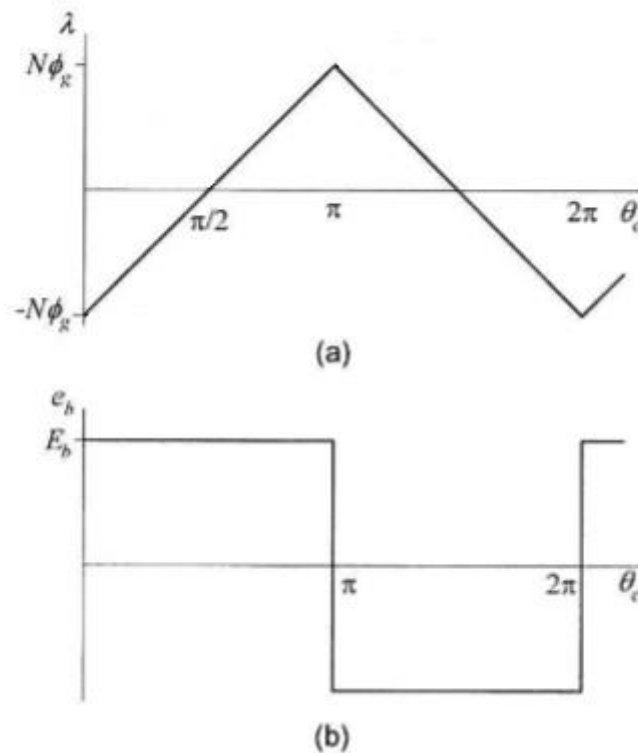


Figura 3.1. Acoblament inductiu i força electromotriu. [12]

A partir de la forma d'ona de l'acoblament inductiu de la Fig. 3.1a, la EMF associada és la derivada de la forma d'ona segons dicta la llei de Faraday. Sempre que l'acoblament inductiu té una forma triangular, la força electromotriu té una forma d'ona quadrada com es mostra a la Fig. 3.1b, El període de la força electromotriu és de 360° elèctrics. Analíticament la seva fórmula és:

$$E_b = \frac{N_m}{2} \omega_m \frac{2\theta_g}{\pi} \quad (3.1)$$

On w_m és la velocitat del motor en rad/s. Per simplificar, el flux de l'entreferro pot ser escrit com

$$\theta_g = \frac{2\pi}{N_m} B_g L_{st} R_{ro} \quad (3.2)$$

On B_g és la densitat de flux de l'entreferro, R_{ro} és el radi de l'entreferro a la superfície de l'imant i L_{st} és la longitud axial del motor. Substituint aquesta relació a (3.1) obtenim que l'amplitud de la força electromotriu E_b és

$$|E_b| = 2NB_g L_{st} R_{ro} w_m = K_e w_m \quad (3.3)$$

Aplicant

$$E_b i = T w_m \quad (3.4)$$

A (3.1) i (3.3) determinem el parell produït pel corrent que flueix per la bobina. Ja que (3.3) és una simple relació algebraica, per a un corrent constant, la forma parell-posició és la mateixa que força electromotriu-posició com es mostra en la Fig. 3.1b. La amplitud del parell bé donada per:

$$|T| = \frac{E_b i}{w_m} = 2NB_g L_{st} R_{ro} i = K_t i \quad (3.5)$$

Mitjançant (3.5) és pot calcular la intensitat que hi ha al motor depenent de la càrrega aplicada.

3.1. Càlcul de les necessitats.

Per tal de definir quin és el parell que haurà de proporcionar el motor s'han fet uns càlculs relacionats amb les forces existents en el diagrama lliure d'un sòlid en una pendent. Per tal de reproduir les diferents condicions en les que es pot trobar l'usuari s'han fet els càlculs per a diferents pendents ascendents i descendents.

Dades:

- Pes del vehicle i l'usuari = 85Kg
- Acceleració en pendents = 0.5m/s²

3.1.1. Velocitat requerida.

Per tal de complir amb el requeriment de velocitat especificat en l'avantprojecte, s'haurà de dimensionar o escollir un motor Brushless DC amb unes determinades característiques.

La velocitat angular (w) del motor ve definida per l'equació

$$w = \frac{v \text{ lineal}}{r} \quad (3.6)$$

Per tal d'assolir una velocitat lineal (v) de 25Km/h amb unes rodes de radi (r) 0.0375m el motor escollit haurà de tenir una velocitat angular mínima que s'obté substituint aquest valors a (3.6)

$$w = \frac{6,95 \text{ m/s}}{0.0375 \text{ m}} = 185,33 \text{ rad/s}$$

que en revolucions per minut són

$$n = 185,33 \text{ rad/s} \times \frac{60}{2\pi} = 1769,77 \text{ rpm}$$

3.1.2. Parell requerit.

Tenint en compte les forces existents en el diagrama del sòlid lliure d'un vehicle en un pla inclinat es fan els càlculs per saber quina és la força necessària per accelerar el longboard a 0.5m/s^2 amb diferents nivells de pendent. La component P es dividida en dues parts, P_x (eix horitzontal al pla) i P_y (eix vertical), així doncs, ja és podran fer els càlculs necessaris.

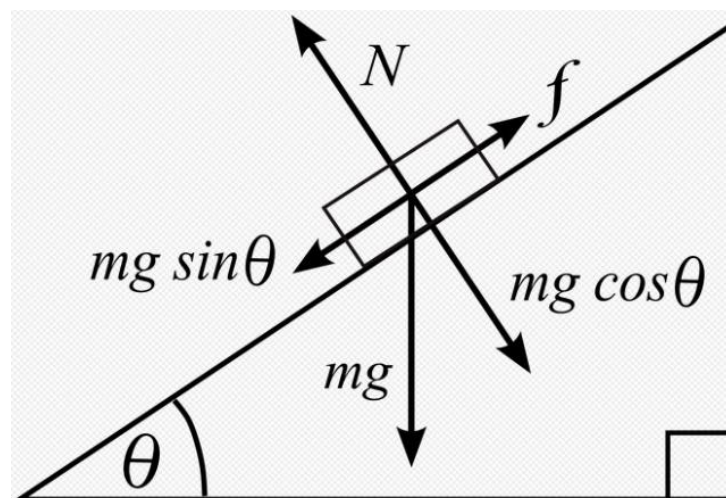


Figura 4.1. Diagrama sòlid lliure d'un sòlid en un pla inclinat

La força necessària per moure un sòlid ve donada per

$$\sum Fx = m \times a \quad (3.7)$$

on m és la massa en N i a l'acceleració en m/s^2 . Desglossant el sumatori de forces i menyspreant la component Py , ja que el coeficient de fregament de les rodes és molt petit s'obté

$$F = m \times a + Px \quad (3.8)$$

On la component Px depèn de l'angle d'inclinació (α) del pendent

$$Px = m \times g \times \sin(\alpha) \quad (3.9)$$

Un cop coneguda la força F necessària per moure el vehicle en el pendent i el radi de la roda es pot calcular el parell T amb l'equació del moment de parell

$$T = \frac{F(N)}{\frac{1}{r(m)}} \quad (Nm) \quad (3.10)$$

Càlculs:

a) Força necessària per afrontar un pendent positiu.

a. Cas més desfavorable on l'angle del pendent és de $\alpha = 10^\circ$. Substituint a (3.8) s'obté:

$$F = 85 \text{ Kg} \times 0,5 \frac{m}{s^2} + \left(85 \text{ Kg} \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times \sin(10^\circ) \right)$$

$$F = 187,296 \text{ N}$$

I substituint F i r a (3.10) s'obté el parell per afrontar el pendent de $\alpha = 10^\circ$:

$$T = \frac{187,296 \text{ N}}{\frac{1}{0,0375m}} = 7,024 \text{ Nm}$$

Amb aquest valor ja es pot dimensionar el motor, ja que és el que marcarà el seu parell màxim.

b. Cas desfavorable on l'angle del pendent és de $\alpha = 5^\circ$. Substituint a (3.8) s'obté:

$$F = 85 \text{ Kg} \times 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + \left(85 \text{ Kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \sin(5^\circ) \right)$$

$$F = 115,175 \text{ N}$$

I substituint F i r a (3.10) s'obté el parell per afrontar el pendent de $\alpha = 10^\circ$:

$$T = \frac{115,175 \text{ N}}{\frac{1}{0,0375 \text{ m}}} = 4,319 \text{ Nm}$$

c. Cas nominal on l'angle del pendent és de $\alpha = 0^\circ$. Substituint a (3.8) s'obté

$$F = 85 \text{ Kg} \times 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 42,5 \text{ N}$$

I substituint F i r a (3.10) obtenim el parell per afrontar el pendent de $\alpha = 0^\circ$:

$$T = \frac{42,5 \text{ N}}{\frac{1}{0,0375 \text{ m}}} = 1,549 \text{ Nm}$$

b) Angle α on $F = 0$ i $a = 0,5 \text{ m/s}^2$. Amb (3.8) però aïllant l'angle en comptes de la força s'obté el pendent descendent en la qual la força necessària per accelerar a $a = 0,5 \text{ m/s}^2$ és zero:

$$\alpha = \arcsin \frac{0,5 \text{ m/s}^2}{9,81 \text{ m/s}^2} = 2,921^\circ$$

c) Força que s'ha de realitzar per mantenir $a = 0 \text{ m/s}^2$ en un pendent descendent.

a. Cas menys desfavorable on l'angle del pendent és de $\alpha = 3^\circ$. Substituint a (3.8) i eliminant la variable d'acceleració s'obté:

$$F = \left(85 \text{ Kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \sin(3^\circ) \right)$$

$$F = 43,640 \text{ N}$$

I substituint F i r a (3.10) s'obté el parell a contrarestar en el pendent de $\alpha = 3^\circ$:

$$T = \frac{43,640 \text{ N}}{\frac{1}{0,0375\text{m}}} = 1,636 \text{ Nm}$$

- b. Cas desfavorable on l'angle del pendent és de $\alpha = 5^\circ$. Substituint a (3.8) i eliminant la variable d'acceleració s'obté:

$$F = \left(85 \text{ Kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \sin(5^\circ) \right)$$

$$F = 72,675 \text{ N}$$

I substituint F i r a (3.10) s'obté el parell a contrarestar en el pendent de $\alpha = 5^\circ$:

$$T = \frac{72,675 \text{ N}}{\frac{1}{0,0375\text{m}}} = 2,735 \text{ Nm}$$

- c. Cas més desfavorable on l'angle del pendent és de $\alpha = 10^\circ$. Substituint a (3.8) i eliminant la variable d'acceleració s'obté:

$$F = \left(85 \text{ Kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \sin(10^\circ) \right)$$

$$F = 144,796 \text{ N}$$

I substituint F i r a (3.10) s'obté el parell a contrarestar en el pendent de $\alpha = 10^\circ$:

$$T = \frac{144,796 \text{ N}}{\frac{1}{0,0375\text{m}}} = 5,910 \text{ Nm}$$

d) Acceleració sense propulsió depenent del pendent.

a. Aïllant l'acceleració i definint $F = 0$ a (3.8) i un angle $\alpha = 5^\circ$ s'obté:

$$a = 9,81 \frac{m}{s^2} \times \sin(5) = 0,855 \frac{m}{s^2}$$

b. Aïllant l'acceleració i definint $F = 0$ a (3.8) i un angle $\alpha = 10^\circ$ s'obté:

$$a = 9,81 \frac{m}{s^2} \times \sin(10) = 1,703 \frac{m}{s^2}$$

c. Aïllant l'acceleració i definint $F = 0$ a (3.8) i un angle $\alpha = 15^\circ$ s'obté:

$$a = 9,81 \frac{m}{s^2} \times \sin(15) = 2,540 \frac{m}{s^2}$$

d. Aïllant l'acceleració i definint $F = 0$ a (3.8) i un angle $\alpha = 20^\circ$ s'obté:

$$a = 9,81 \frac{m}{s^2} \times \sin(20) = 3,335 \frac{m}{s^2}$$

Resum de forces:

Forces per afrontar un pendent ascendent amb $a=0,5\text{m/s}^2$			
Desnivell	Angle (α)	Força (Fx)	Parell (T)
Ascendent	10°	187,296 N	7,024 Nm
Ascendent	5°	113,175 N	4,244 Nm
Pla	0°	42,5 N	1,594 Nm
Descendent	2.921°	0 N	0 Nm

Taula 3.1. Forces de propulsió.

Acceleració en un pendent descendent sense propulsió ($F_x = 0$)	
Angle (α)	a
5°	0,855 m/s^2
10°	1,703 m/s^2
15°	2,540 m/s^2
20°	3,355 m/s^2

Taula 3.2. Acceleració en diferents pendents

Força a contrarestar per mantenir una velocitat constant en un pendent ($a = 0 \text{ m/s}^2$)		
Angle (α)	Força (Fx)	Parell (T)
3°	43,640 N	1,636 Nm
5°	72,675 N	2,735 Nm
10°	144,796 N	5,910 Nm

Taula 3.3. Força a contrarestar per mantenir la velocitat constant

3.2. Selecció del motor.

Un cop definit el parell màxim necessari per afrontar el pendent més desfavorable (10°) i la velocitat angular necessària per assolir la velocitat màxima (6,95m/s) ja es pot seleccionar un motor Brushless DC. Per al desenvolupament d'aquest projecte s'ha escollit el motor 5065 270KV sensored de Alien Power System.



Figura 4.2. Motor Brushless DC de Alien Power System

Dades del bobinat:

- Voltatge = 29,6 V.
- Velocitat angular màxima (rpm) = $29,6 * 270Kv = 7992$ rpm
- Costant de parell, $K_t = 0.0398$ Nm/A
- Resistència a $25^\circ C$, $R_m = 0,42$ ohm.
- No load current = 1,5A
- Màxima potència constant de sortida = 2000 W
- Max Amp = 60 A

El parell màxim del motor és pot calcular amb (3.5) si es coneix la constant de parell, però també es pot calcular amb l'equació:

$$T = \frac{\text{Potència (W)}}{\omega \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)} \quad (3.11)$$

Substituint a (3.11) amb els paràmetres del motor obtenim el parell màxim:

$$T = \frac{2000 \text{ W}}{\frac{(29,6V * 270) * 2\pi}{60}} = 2,390 \text{ Nm}$$

El parell màxim del motor és insuficient per l'aplicació, per aquest motiu s'implementarà un sistema de transmissió amb reductor de velocitat, que farà que augmenti el parell de sortida.

També es pot determinar el corrent que consumeix el motor depenent del parell que se li exigeix amb (3.5). És important determinar aquests valors d'intensitat per les diferents situacions que es pot trobar l'usuari utilitzant el longboard. Aquests valors seran calculats un cop es conegui la relació de transmissió de potència.

3.3. Transmissió de potència amb reductor simple.

Com es pot apreciar en l'apartat 3.1.2, el parell requerit per afrontar un pendent de 10° és de 7,024 Nm i el parell màxim del motor és de 2,390 Nm. Per aquest motiu s'haurà d'utilitzar un reductor de velocitat, que també farà la funció de transmissió.



Figura 4.3. Corretja dentada trapezoïdal

S'ha escollit una corretja dentada trapezoïdal degut al seu alt rendiment (proper a 1), que només depèn del lliscament funcional que està relacionat amb la rigidesa de la corretja, valor que no acostumen a proporcionar els fabricants degut a que és menyspreable. Tot i això, per seguretat s'agafarà un rendiment del 99%.

Per assolir el parell de sortida necessari, s'haurà d'implementar una transmissió amb reducció de la velocitat. Segons la seva constant de voltatge $K_e = 270 \text{ V/rpm}$, si apliquem 29,6V al motor la velocitat del motor és de 7992 rpm i el parell de 2,390 Nm, per a una velocitat a la sortida del reductor de 2285 rpm, el parell resultant màxim és de:

$$n_1 * T_1 = n_2 * T_2 \quad (3.12)$$

$$T_2 = \frac{7992 \text{ rpm} * 2,390 \text{ Nm}}{2285 \text{ rpm}} = 8,359 \text{ Nm}$$

Aplicant el 99% de rendiment:

$$T_2 = 0,99 \times 8,359 \text{ Nm} = 8,275 \text{ Nm}$$

Com es pot veure, el parell resultant després del reductor de velocitat és suficient per les necessitats del longboard. S'obté una relació de transmissió de:

$$\text{Relació de transmissió} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{8,275 \text{ Nm}}{2,390 \text{ Nm}} = 3,462$$

Es prendrà com a velocitat màxima del motor 2000 rpm, d'aquesta manera s'assegura que el longboard arribi a la velocitat màxima teòrica. Per aquest motiu, la velocitat màxima lineal és:

$$v = \text{velocitat angular } \omega * \text{radi } r \quad (3.13)$$

Substituint la els valors a (3.13) s'obté la velocitat lineal:

$$v = \left(\frac{2000 \text{ rpm} * 2\pi}{60} \right) * 0,0375 \text{ m} = 7,854 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Com es pot apreciar, la velocitat lineal satisfà els requeriments de l'usuari.

3.4. Intensitat dependent de la càrrega.

3.4.1. Intensitat consumida dependent de la càrrega.

Un cop coneguda la força i el parell que ha de realitzar el motor per afrontar diferents angles de pendent ascendent, la relació de transmissió de l'engranatge i el constant de parell del motor ja es pot utilitzar l'equació (3.5) per calcular la intensitat que consumirà el motor en les diferents situacions, d'aquesta manera es podrà dimensionar la bateria.

- a) Cas més desfavorable (angle del pendent = 10°):

$$i = \frac{T}{K_t} = \frac{2,107 \text{ Nm}}{0,0398 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}} = 52,945 \text{ A}$$

- b) Cas desfavorable (angle del pendent = 5°):

$$i = \frac{T}{K_t} = \frac{1,273 \text{ Nm}}{0,0398 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}} = 31,990 \text{ A}$$

- c) Cas nominal (angle del pendent = 0°):

$$i = \frac{T}{K_t} = \frac{0,478 \text{ Nm}}{0,0398 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}} = 12,015 \text{ A}$$

3.4.1. Intensitat generada dependent de la càrrega.

Un cop coneguda la força i el parell que ha de contrarestar el motor per mantenir la velocitat constant en diferents pendents descendents, la relació de transmissió de l'engranatge i el constant de parell del motor ja es pot utilitzar l'equació (3.5) per calcular la intensitat que generarà el motor en les diferents situacions, d'aquesta manera es podrà dimensionar la bateria.

- a) Cas més desfavorable (angle del pendent = 10°):

$$i = \frac{T}{K_t} = \frac{1,705 \text{ Nm}}{0,0398 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}} = 42,851 \text{ A}$$

b) Cas desfavorable (angle del pendent = 5°):

$$i = \frac{T}{K_t} = \frac{0,789 \text{ Nm}}{0,0398 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}} = 19,830 \text{ A}$$

c) Cas menys desfavorable (angle del pendent = 3°):

$$i = \frac{T}{K_t} = \frac{0,4721 \text{ Nm}}{0,0398 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}} = 11,862 \text{ A}$$

4. Bateria

Les bateries han avançat molt des del seu descobriment, avui en dia hi ha bateries d'alt rendiment amb capacitat per emmagatzemar grans quantitats d'energia i de proporcionar-la a la xarxa de forma ràpida i segura. Obtenir una bateria de dimensions reduïdes, amb un pes relativament baix i que satisfaci les necessitats requerides es possible connectant diferents cel·les de Ió Liti en sèrie o en paral·lel. Si aquesta connexió es fa en paral·lel se suma la capacitat (Ah) de les bateries i es manté constant el seu voltatge, en canvi, si es connecten les bateries en sèrie, s'aconsegueix augmentar el voltatge nominal del conjunt.

La bateria és un element fonamental en aquest projecte, ja que en depenen de forma directa l'autonomia i el pes del vehicle. La bateria és l'element que proporciona energia elèctrica al motor i als diferents dispositius de control. De tots els diferents tipus de bateries s'ha escollit una bateria de ions de liti, ja que les seves propietats són òptimes per a aquests tipus d'aplicacions.

A l'hora de seleccionar la bateria, s'han de tenir en compte les diferents necessitats que té l'aplicació, com ara:

- L'usuari: L'usuari del longboard adquireix un producte amb una autonomia mínima, que li permetrà realitzar de forma completa els recorreguts que tingui previstos. Aquesta autonomia va de 10 km a 15 km.
- El longboard: Per a aquest tipus de vehicle es necessari que la bateria sigui lleugera i plana, d'aquesta manera no augmentem excessivament el pes i la bateria queda lluny del terra.
- El motor: necessitem una bateria de 29.6V i amb un corrent màxim de descarrega de almenys 60A.

Tenint en compte aquestes necessitats, es plantegen diferents situacions per adequar les especificacions de la bateria. Es pren com a referència el temps que haurà de funcionar el longboard a velocitat màxima per recorre la distància requerida.

Es pren com punt mitjà el consum que tindrà el longboard en una superfície plana accelerant a $a = 0.5 \text{ m/s}^2$.

La capacitat necessària per assolir la autonomia requerida vindrà donada per l'equació:

$$\frac{\text{Capacitat de la bateria (Ah)}}{\text{Intensitat de descarrega (A)}} = \text{Hores} \quad (4.1)$$

Per tant substituint (4.1) pels valors corresponents s'obté el temps d'utilització;

$$\frac{15000 \text{ m}}{7.854 \text{ m/s}} = 1909,85 \text{ s} = 0,531 \text{ hores}$$

La capacitat de la bateria per realitzar el trajecte de 15 Km amb una trajectòria sense desnivell, és a dir, consumint 12,015A és de:

$$\text{Capacitat de la bateria (Ah)} = 12,015 \text{ A} * 0,531 \text{ h} = 6,374 \text{ Ah}$$

S'augmenta la capacitat de la bateria com a mesura de seguretat, ja que hi ha molts factors com el temps de desús i la temperatura que afecten a la capacitat. Per aquest motiu es decideix implementar una bateria de 10Ah.

Com es descriu a l'apartat 2.5. es poden combinar cel·les del mateix compost per augmentar el seu voltatge nominal o la seva capacitat. Un cop es coneix la capacitat de la bateria i el voltatge que requereix el motor 29.6V, s'ha escollit un pack de 8 cel·les del tipus:

High Power Pilymer Li-Ion Cell (PL-9759156-10C) de la marca Portable Power Corporation. Amb unes característiques:

- Química: Ió Liti – Polímer.
- Capacitat Nominal = 10 Ah.
- Radi de càrrega = Entre 5 A i 10 A.
- Radi de descàrrega contínua = 80 A.
- Radi de descarrega màxima (menys de 10 s) = 100 A.
- Dimensions (LxWxH) = 160mm x 64mm x 10,5mm
- Voltatge = 3,7 V.
- Pes = 207g
- Pes del conjunt (8 cel·les) = 1,656 Kg



Figura 4.1. Cel·la de la bateria seleccionada

Càlcul de l'autonomia en diferents situacions utilitzant (4.1):

- a) Cas nominal (angle del pendent = 0°)
- Intensitat del motor $I = 12,015 \text{ A}$.
 - Autonomia requerida = 15000 m.
 - Velocitat màxima = 7,854 m/s.

S'aplica un coeficient de seguretat del 80%.

$$\frac{10 \text{ Ah}}{12,015 \text{ A}} = 0,832 \text{ hores} = 49,92 \text{ min} * 0,8 = 39,936 \text{ min.}$$

Amb una velocitat de $v = 7,854 \text{ m/s}$:

$$39,936 \text{ min} \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} * 7,854 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 18820 \text{ m}$$

Com es pot veure, se supera l'autonomia requerida.

- b) Cas desfavorable (angle del pendent = 5°)
- Intensitat del motor $I = 31,990 \text{ A}$.
 - Velocitat màxima = 7,854 m/s.

S'aplica un coeficient de seguretat del 80%.

$$\frac{10 \text{ Ah}}{39,990 \text{ A}} = 0,313 \text{ hores} = 18,756 \text{ min} * 0,8 = 15 \text{ min.}$$

Amb una velocitat de $v = 7,854 \text{ m/s}$:

$$15 \text{ min} \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} * 7,854 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7071 \text{ m}$$

Com es pot veure, el longboard és te una autonomia considerable tot i anar per un pendent ascendent.

c) Cas més desfavorable (angle del pendent = 10°)

- Intensitat del motor $I = 52,945 \text{ A}$.
- Velocitat màxima = 7.854 m/s .

S'aplica un coeficient de seguretat del 80%.

$$\frac{10 \text{ Ah}}{52,945 \text{ A}} = 0,189 \text{ hores} = 11,332 \text{ min} * 0.8 = 9,067 \text{ min.}$$

Amb una velocitat de $v = 7,854 \text{ m/s}$:

$$9,067 \text{ min} \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} * 7,854 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 4272 \text{ m}$$

Com es pot veure, el longboard te una bona autonomia tot hi anar per un pendent molt desfavorable.

La gràfica del temps d'ús amb diferents intensitats de consum és la següent:

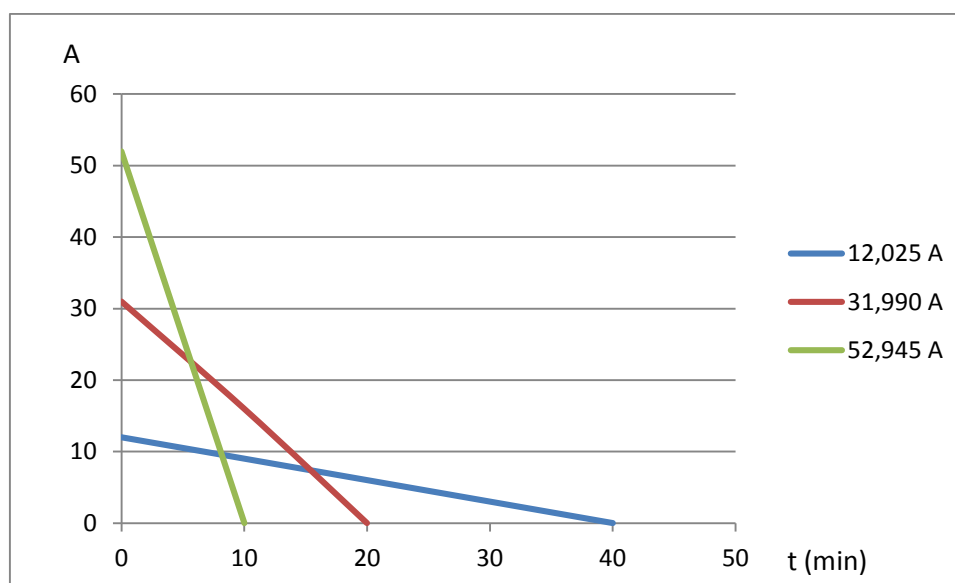


Figura 4.2. Temps de descarrega de la bateria seleccionada

5. Control del motor BLDC .

En aquest capítol es descriu la implementació teòrica i el funcionament de cada una de les parts que formen el control de l'electrònica de potència necessària en el projecte. Això implica també la selecció dels components que s'adeqüen més a les necessitats del projecte.

Aquestes parts s'han de dimensionar correctament, de tal manera que concordin els valors i l'electrònica funcioni correctament, per exemple, s'ha d'escollir un microcontrolador on el voltatge i el corrent del senyal PWM de sortida sigui suficientment alt com per excitar la porta del transistor del pont trifàsic.

El control d'un motor BLDC consisteix en generar corrents DC a les fases del motor. Aquest control està subdividit en dos operacions independents: sincronització del flux l'estator i el rotor i el control de la tensió i el corrent, en cadascuna d'aquestes aplicacions es necessita l'inversor trifàsic.

La sincronització del flux ve derivada de la informació dels sensors de posició, segons la posició del rotor el controlador determina quins transistors són els que han de conduir. La regulació del corrent bé realitzada per el control PWM.

5.1. Tècniques de control.

Degut a la necessitat de la commutació electrònica per al funcionament dels motors d'imants permanents, s'han creat diferents tècniques per controlar quin bobinat és excitat en cada moment. Aquestes tècniques es classifiquen segons el seu algoritme de control. El tipus de control escollit per aquest projecte és el control trapezoïdal, degut a que és el més senzill d'implementar. Els més utilitzat són:

5.1.1. Control trapezoïdal.

Commutació trapezoïdal: És un dels tipus de control més simples. Consisteix en excitar les bobines amb el pol positiu o el negatiu per generar un camp magnètic en una direcció o en la oposada i provocar així la rotació del motor que està polaritzat magnèticament.

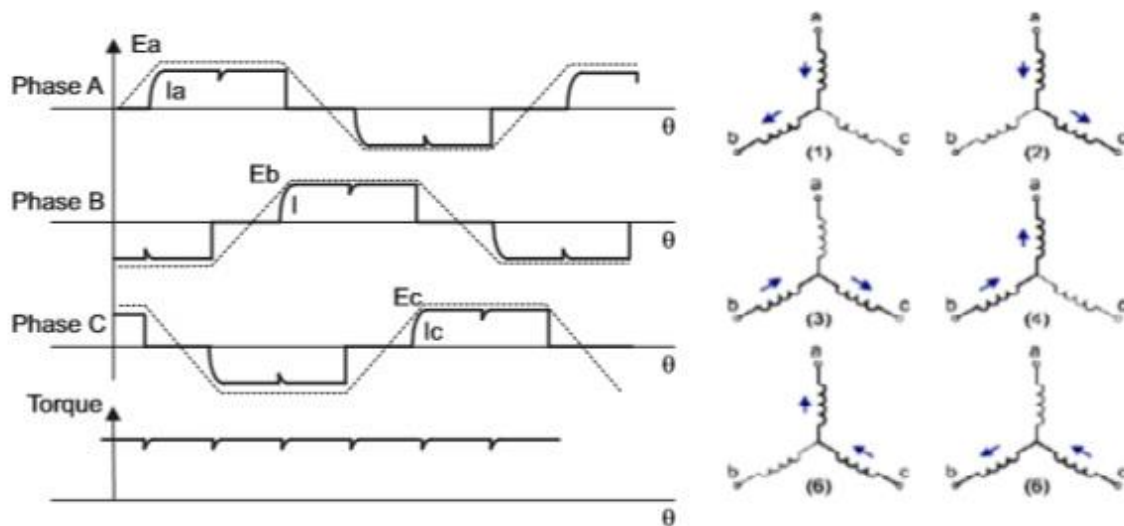


Figura 5.1. Forma d'ona elèctrica per fases i commutació dels bobinats. [13]

En la Fig. 5.1. es controla el corrent que circula per els bobinats del motor, excitant dos fases simultàniament i mantenint la tercera fase desconnectada. Successivament es va alternant el parell de terminals a excitat, fins a passar per les sis combinacions possibles.

Els sensors Hall situats en el motor són utilitzats per proporcionar la posició aproximada del rotor al microcontrolador i que aquest pugui determinar quines són les següents fases a excitar.

5.1.2. Control Sinusoïdal.

La commutació sinusoïdal és vista com un mode de control més avançat i exacte que el control trapezoïdal, ja que intenta controlar la posició del rotor de forma contínua. Aquesta continuïtat s'aconsegueix aplicant simultàniament tres corrents sinusoïdals desfasades 120° als tres bobinats del motor. La fase de funcionament d'aquestes corrents s'escull de forma que tingui un valor constant i que el vector de corrents resultant sempre està en quadratura amb la orientació del rotor.

Com a conseqüència d'aquest procediment s'obté un parell més precís i sense el típic arissat de la commutació trapezoïdal. No obstant, per poder generar aquesta modulació sinusoidal es necessita una mesura precisa de la posició del rotor. Degut a que els sensors d'efecte Hall només proporcionen la posició aproximada del rotor és necessari l'ús d'algun altre dispositiu que aporti més precisió.

5.1.3. Control vectorial.

El control vectorial és el més complex i el que requereix major potència de càlcul, però també és el que millors resultats proporciona. El problema principal que presenta la commutació sinusoidal és que intenta controlar directament les corrents que circulen pel motor, les quals són intrínsecament variants en el temps. Al augmentar la velocitat del motor, i en conseqüència la freqüència de les corrents, comencen a aparèixer problemes.

El control vectorial o també anomenat en anglès Field Oriented Control (FOC) soluciona el problema controlant el vector dels corrents directament en un espai de referència ortogonal i rotacional, anomenat espai D-Q (Direct – Quadrature). Aquest espai de referència està totalment alineat amb el rotor de forma que permet que el control del flux i del parell del motor es realitzi de forma independent. El component directe permet controlar el flux i el component en quadratura el parell.

Per poder realitzar aquest control, és necessari transformar matemàticament les tres mesures de les tres corrents referides a l'espai estàtic de les bobines del motor a l'espai rotacional D-Q. Aquesta transformació pot realitzar-se amb un únic pas, però realment es divideix en dues transformacions:

- Transformada de Clarke: Transformació d'un sistema de tres fases equiespaiades en un sistema de dues fases ortogonals. Les equacions són les següents:

$$\begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos\varphi & \cos 2\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \sin 2\varphi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

- Transformada de Park: és la transformació d'un sistema ortogonal a un sistema rotacional. Les equacions són les següents:

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

En aquest sistema també és important conèixer la posició del rotor amb exactitud, ja que un petit error en l'estimació de la posició provocarà que el component directe i de quadratura no estiguin totalment desacoblades.

Tot i la complexitat de les transformacions, una vegada aquestes són aplicades, el control del motor es simplifica.

5.2. El convertidor estàtic

Va ser l'any 1947 quan el transistor va substituir a la vàlvula del buit en els ordinadors de la època, i des d'aquell moment la microelectrònica i els transistors no han parat d'evolucionar.

Avui en dia podem trobar diferents tipus de transistors, depenent de la freqüència de commutació, del voltatge i del corrent que ha de controlar. Entre aquests tipus de transistors hi ha els IGBT (Isulated Gate Bipolar Transistor) i els MOSFET (Metal-oxide.semiconductor Field-effect transistor). Aquests transistors s'utilitzen per amplificar o commutar senyals electròniques i s'utilitzen en aplicacions com el control de tracció de motors.

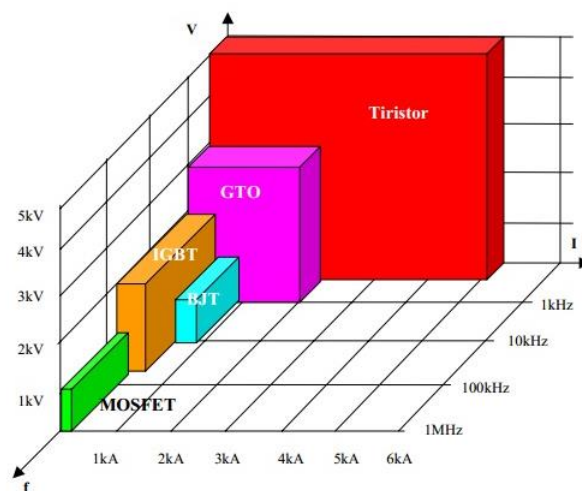


Figura 5.2. Valors de funcionament dels diferents tipus de transistors.

Com ja hem vist en l'apartat 2.3 convertidor estàtic, s'ha d'implementar un pont trifàsic per controlar les tres fases del motor Brushless DC. Es construeix un inversor trifàsic mitjançant tres inversors monofàsics, per això són necessaris 6 transistors. A part d'aquests

sis dispositius, també hi haurà sis díodes de conducció lliure que assegurin que el corrent negatiu generat x la força contra electromotriu generada pel motor no circuli per els dispositius de commutació i arribi a la bateria.

5.3. Driver del inversor.

Un dels problemes que es poden presentar en la implementació de l'electrònica és que el microcontrolador no pugui excitar les portes dels transistors. En aquest cas s'hauria de posar un driver entre aquests components. El driver és un amplificador que accepta inputs de baixa potència del controlador i produeix un senyal més potent cap al transistor.

5.4. Microcontrolador.

El microcontrolador te la funció de llegir el senyal provinent dels sensors d'efecte Hall que marquen la posició del rotor tal i com s'especifica a l'apartat 2.5, i la velocitat de referència. Amb aquestes dues informacions crea un senyal PWM per determinar quin parell de transistors han de conduir en cada moment.

La millor forma de veure com es relacionen els sensors d'efecte Hall i els transistors del pont trifàsic és implementar un motor trifàsic amb dos pols magnètics. Aquest sistema necessitarà 6 commutacions per realitzar una revolució del motor completa, i aquestes commutacions segueixen una seqüència generada per el microcontrolador del tipus:

Estat	Sensor Hall A	Sensor Hall B	Sensor Hall C	Fase A	Fase B	Fase C
5	1	0	1	$-V_{DC}$	$+V_{DC}$	0
1	0	0	1	$-V_{DC}$	0	$+V_{DC}$
3	0	1	1	0	$-V_{DC}$	$+V_{DC}$
2	0	1	0	$+V_{DC}$	$-V_{DC}$	0
6	1	1	0	$+V_{DC}$	0	$-V_{DC}$
4	1	0	0	0	$+V_{DC}$	$-V_{DC}$

Taula 5.1. Relació de commutació entre els sensors Hall i els transistors

Mètode Pulse Width Modulation (PWM): La tensió d'alimentació es talla a una freqüència fixe amb un cicle de treball que ve determinant per l'error de corrent. Per tant, tant el corrent i el radi de carrega de corrent poden ser controlats. La durada de l'alimentació de dues fases concretes ve determinada per l'angle de commutació. La principal avantatge del control PWM és que la freqüència de tall és un paràmetre fixe, per lo tant, el soroll acústic i electromagnètic és fàcil d'eliminar.

Durant la commutació, només dos transistors s'encenen quan el corrent es conduït des de la font d'alimentació cap a la fase del motor Brushless DC, és a dir, només hi haurà dos senyals PWM actives. En una fase, el transistor de la branca superior està en ON, en la segona fase, el transistors de la branca inferior està en ON i la tercera fase no està alimentada. Quan el vehicle avança lliurement, cap de les tres fases està alimentada.

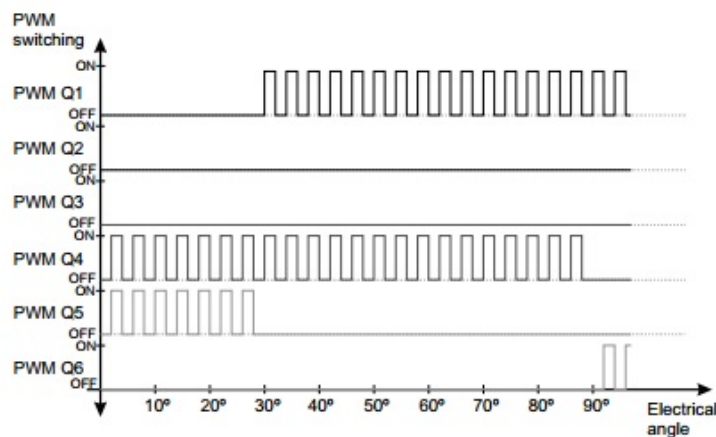


Figura 5.3. Commutació PWM dels transistors. [13]

6. Selecció dels components electrònics.

En aquest apartat es poden veure les característiques que tenen els components seleccionats i el perquè d'aquests atributs.

6.1. Transistors.

El transistor escollit per implementar el pont inversor trifàsic és el MOSFET IRL40B215 canal N de International Rectifier. És un transistor de la família StrongIRFET que es caracteritza tenir la capacitat de conduir grans valors de corrent. En quant a canvis de tensió dinàmics, aquests tipus de transistors tenen una robustesa ideal per aplicacions industrials.com el control de motors, eines de potència, inversors i gestió de bateria on rendiment i robustesa són essencials.



Figura 6.1. Mosfet IRL40B215

Les aplicacions òptimes per a aquest transistor són el control de motors Brushed i Brushless, circuits de potencia de bateries, topologies de mig pont i de pont sencer i convertidors dc/dc. Les principals característiques del transistor IRL40B215 són les següents:

- Unitat de nivell lògic optimitzada.
- Porta millorada, més robusta en quant a variacions de tensió.
- Completament caracteritzat per evitar sobretensions.
- Cos del díode millorat per suportar sobretensions i sobreintensitats.
- Corrent de drenatge continu, $I_D = 164A$
- Corrent de drenatge en un pols, $I_{DM} = 656 A$.
- Rang de temperatura d'operació $T_J = -55$ to $175^\circ C$.

- Voltatge de curtcircuit drenador sortidor, $V_{DSS} = 40V$
- Voltatge llindar de la porta, $V_{GS} = 1V - 2,4V$
- Corrent del sortidor continua (díode), $I_s = 164A$

Tot i tenir una intensitat màxima del motor de 52A, s'ha escollit un transistor amb més capacitat per si es decideix posar un motor més potent en futures modificacions del vehicle.

6.2. Driver del inversor.

En aquesta aplicació és necessari implementar el driver del inversor trifàsic ja que la tensió de sortida del microcontrolador és de 2,4 V, suficient per superar el llindar del voltatge de la porta del transistor, però s'acaba implementant per assegurar el funcionament en cas de futures modificacions dels components. Per això, el driver escollit per assegurar que el senyal PWM excita les portes del transistors és el DRV8308 Brushless DC motor controller de Texas Instruments.

El DRV8303 controla motors Brushless DC amb característiques avançades i amb una sola interfície d'entrada. Com a predriver, impulsa les portes de 6 MOSFETS canal N exteriors amb un corrent configurable entre 10mA i 130mA per tal de assegurar que el senyal PWM excita les portes d'aquests 6 transistors de forma òptima.

El driver te capacitat per operar en llaç tancat ja que te la capacitat d'utilitzar l'entrada d'el senyal dels sensors Hall, però també pot treballar en llaç obert amb una ordre de cicle de treball provinent d'un rellotge extern.

6.3. Microcontrolador.

El microcontrolador seleccionat per a generar el senyal PWM és el Z8FMC16100 de Zilog Company.

Aquest microcontrolador forma part de la família Z8 Encore. És un microcontrolador optimitzat pel aplicacions de control de motors i és compatible amb el control de motors d'una o diferents fases. El dispositiu Z8FMC16100 ofereix un senyal PWM flexible, amb tres parells de senyals o sis senyals PWM totalment independents i capacitat per gestionar el senyal depenent del senyal d'entrada provinent dels sensors d'efecte Hall. Les principals característiques del microcontrolador Z8FMC16100 són:

- 20MHz ZiLOG eZ8 CPU core.
- Més de 16KN de memòria flash programable
- Convertidor analògic-digital amb 8 canals.

- Mòdul PWM de 12 bits.
- Comparador analògic.
- Tensió d'alimentació, $V_{DD} = 2,7$ a $3,6V$.
- Nivell alt del voltatge de sortida, $V_{OH} = 2,4V$

L'assemblatge d'aquests dispositius conforma la part electrònica del Ionboard elèctric.

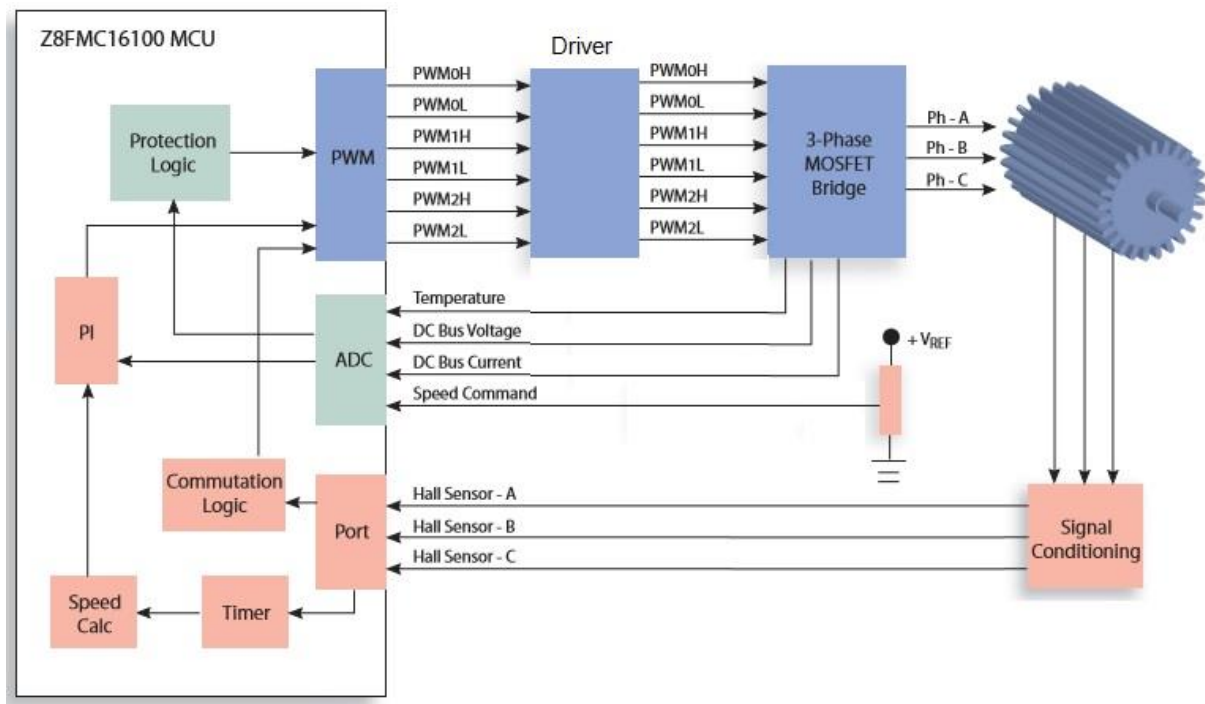


Figura 6.2. Diagrama de blocs del sistema electrònic.

Com s'especifica a l'abast, el disseny del comandament remot que controla la velocitat i del sistema de connexió sense fils no forma part del projecte, però cal dir que la tensió de referència V_{REF} que es veu a la figura anterior hauria d'estar connectat a un dispositiu de comunicació sense fils connectat al comandament remot, on se seleccionaria la velocitat a la qual es vol anar.

7. Implementació i simulació.

En aquest apartat es veurà el circuit que s'ha d'implementar en la solució real i que s'han seleccionat i analitzat alguns dels components en el capítol anterior i també un segon circuit equivalent, que s'ha utilitzat per poder simular el conjunt d'elements que formen l'electrònica de potència del vehicle elèctric sense implementar el microcontrolador al software de simulació.

7.1. Implementació dels components electrònics i de potència.

Aquest és el circuit de control i de potència que utilitza la versió teòrica del vehicle i que posteriorment s'haurà d'implementar en la solució real.

El circuit electrònic de potència necessari per implementar aquesta solució està compost, com ja hem pogut veure en l'apartat anterior, d'una bateria que proporciona energia al sistema, una part de control formada per un microcontrolador, un driver de potència i un pont inversor trifàsic que controlen el motor Brushless DC. En aquest cas, els sensors d'efecte Hall del motor donen la informació que el microcontrolador necessita per generar la seqüència de commutació dels transistors i la freqüència del tren de polsos necessaris en cada moment. El driver actua en aquest cas com a amplificador del senyal per assegurar que el senyal PWM activa les portes dels transistors. Aquest circuit és pot veure en la següent figura:

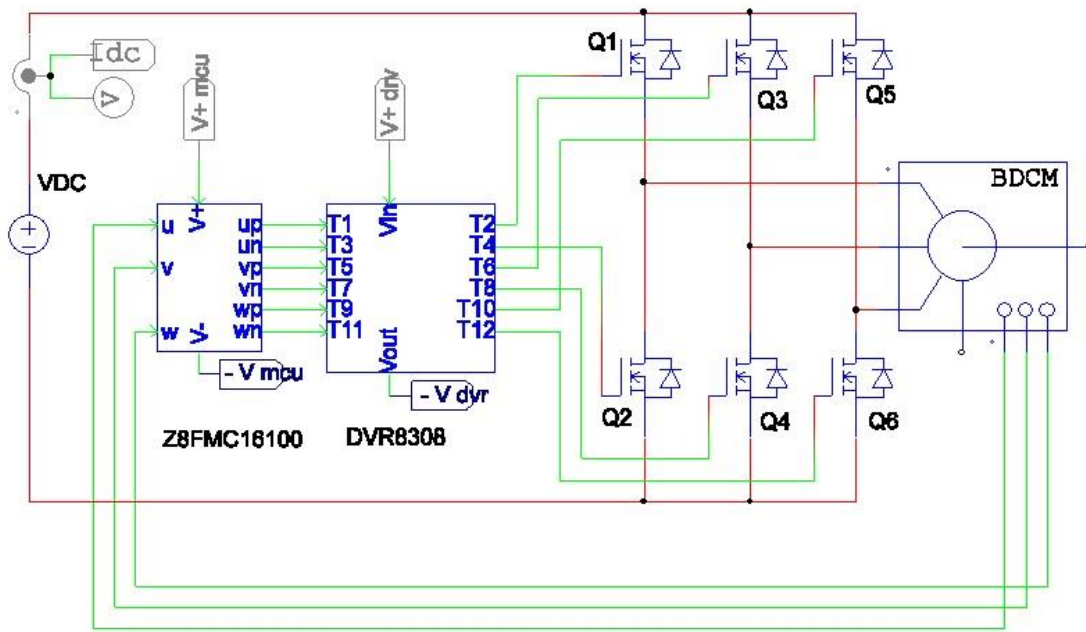


Figura 7.1. Circuit de potència i control PSIM.

També hi ha un circuit secundari que consta de dos transformadors, en aquest cas són ideals, aquest circuit té la funció d'alimentar els components electrònics del sistema i proporcionar-los seguretat.

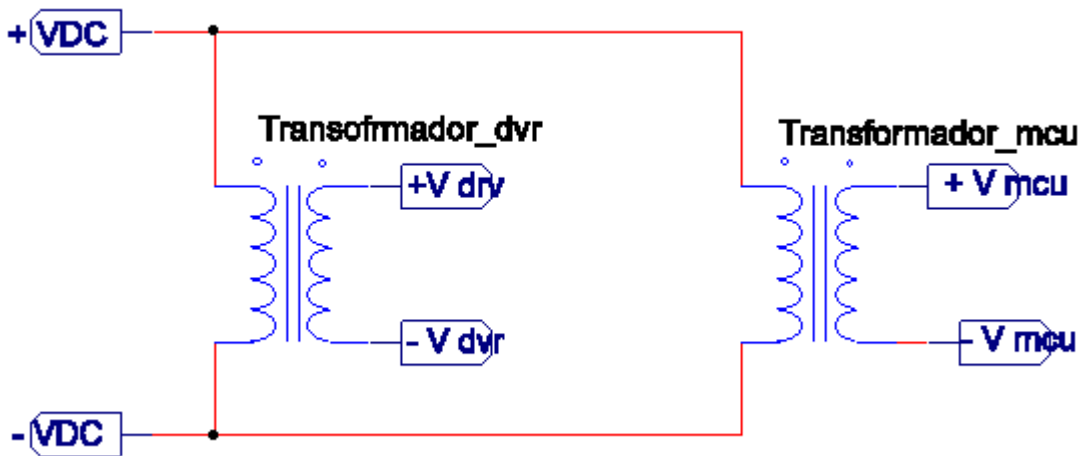


Figura 7.2. Circuit d'alimentació de l'electrònica de control PSIM.

7.2. Simulació de l'electrònica de potència.

En aquest subapartat es pretén demostrar que el circuit compost per una bateria recarregable, un inversor trifàsic i un motor Brushless DC pot ser utilitzat tant com a motor com a generador dependent de les condicions d'utilització.

S'ha utilitzat un circuit estàndard on es genera un senyal PWM com a resultat de la comparació entre una senyal quadrada i una altre triangular. Aquest senyal combinat amb el dels sensors Hall quan aquests estan actius activen una porta lògica "AND" i exciten el seu transistor corresponent. El circuit utilitzat únicament per a aquesta simulació és mostra en la següent figura.

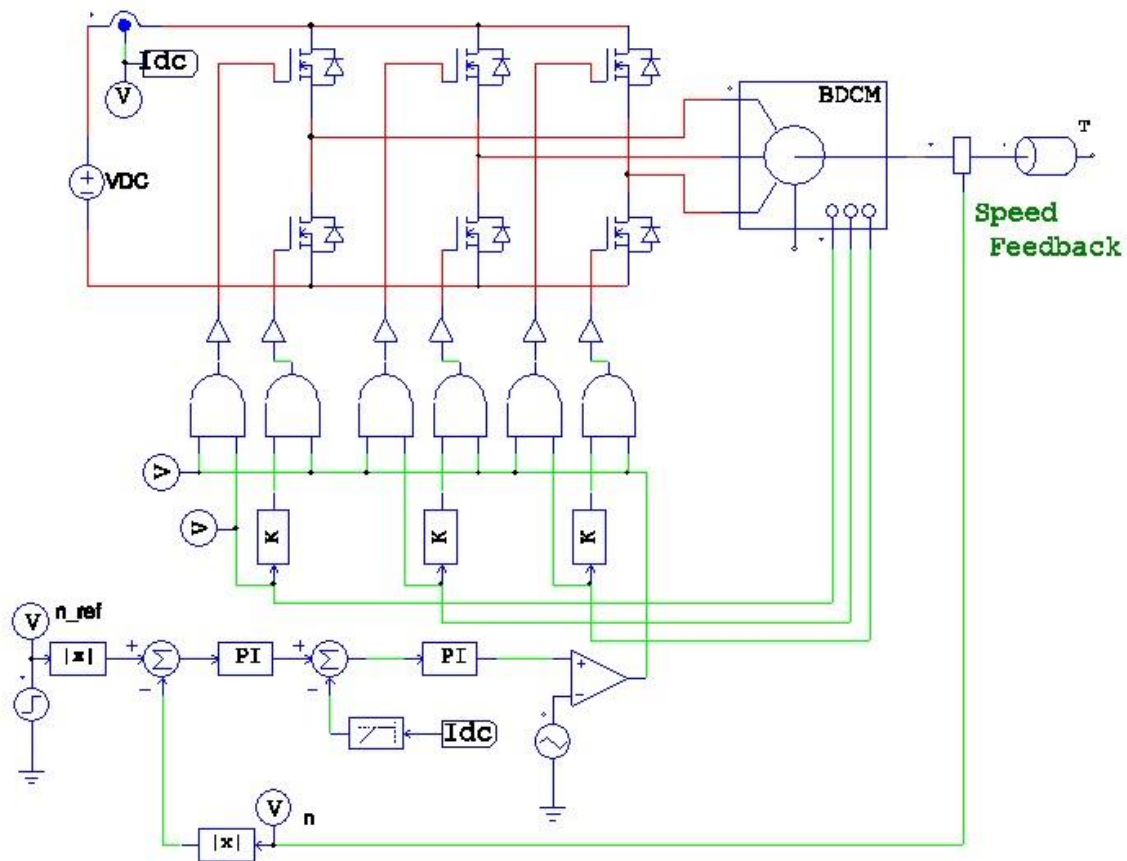


Figura 7.3. Circuit per a la simulació PSIM.

La simulació s'ha realitzat amb un valor de velocitat constant (n_{ref}) de 700rpm, i s'ha anat afegint una càrrega al motor en forma de parell negatiu per simular les condicions que es trobaria el vehicle en un pendent descendent, on el corrent generat per la força contraelectromotriu és més elevat que el voltatge proporcionat per la bateria. Cal dir que la càrrega és aplicada directament al motor, sense tenir en compte la relació de transmissió, és a dir, si es vol el valor de la càrrega relacionada amb l'angle d'inclinació del pendent s'hauria de multiplicar per 3,5.

Simulació sense càrrega:

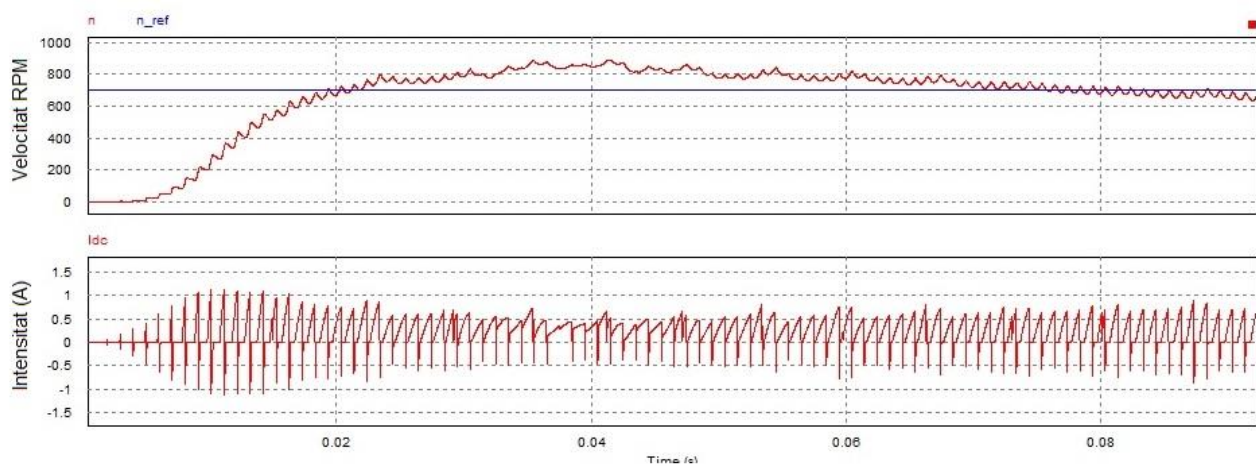


Figura 7.4. Simulació sense càrrega.

Simulació amb una càrrega de -0.4 Nm.

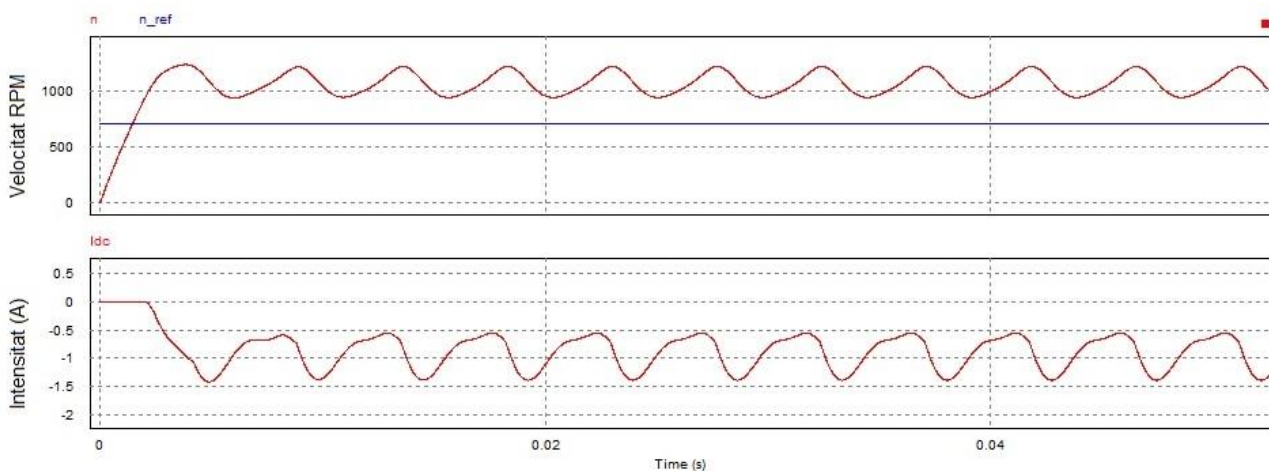


Figura 7.5. Simulació amb una càrrega de -0,4 Nm.

Com es pot apreciar, tot i que no ho aconsegueix del tot, el motor intenta mantenir una velocitat constant. Per aquest motiu es genera una intensitat negativa que carrega la bateria.

Simulació amb $-0,8$ Nm:

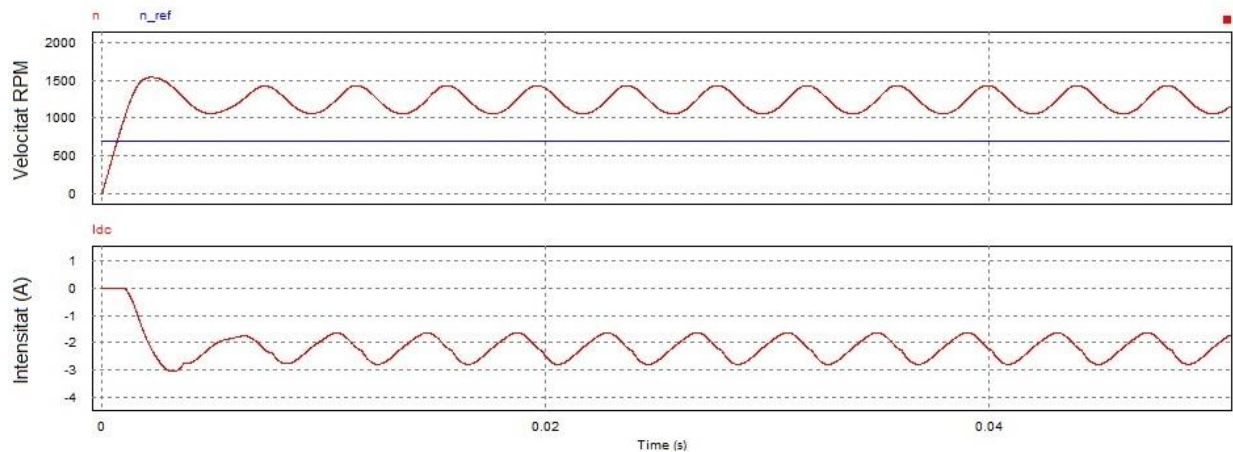


Figura 7.6. Simulació amb una càrrega de $0,8$ Nm.

Com es pot apreciar, el valor del corrent negatiu s'ha duplicat degut a que el valor del parell aplicat com a càrrega també ho ha fet.

La finalitat d'aquesta simulació és demostrar que el sistema dissenyat i dimensionat en aquest projecte és vàlid per utilitzar un motor Brushless DC com a motor i també com a generador. Tot i que no sigui una simulació extremadament fidel a la realitat, ja que hi ha molts valors i característiques del motor que són desconegudes, l'objectiu de mantenir una velocitat constant en un pendent descendent i carregar la bateria al mateix temps ha estat assolit.

En futures línies de treball, caldrà tant implantar el circuit del microcontrolador i el driver com conèixer totes les especificacions del motor per fer una simulació més real i poder tenir un control sobre el motor més precís.

8. Disseny general en Solidworks.

En aquest apartat es dissenya el longboard de forma no detallada. Serveix per fer-se una idea de com es el vehicle en general. Als plànols s'indica la distància entre els components principals del longboard. També s'ha fet un conjunt de simulacions per assegurar que els materials amb els quals s'ha dissenyat el longboard són suficientment resistents.

8.1. Longboard en 3D.

S'ha fet un disseny superficial en Solidworks del longboard, però és suficient per tenir una visió de com serà el vehicle amb els components afegits. El Longboard tindrà un aspecte similar al que es pot visualitzar en les dues següents figures:

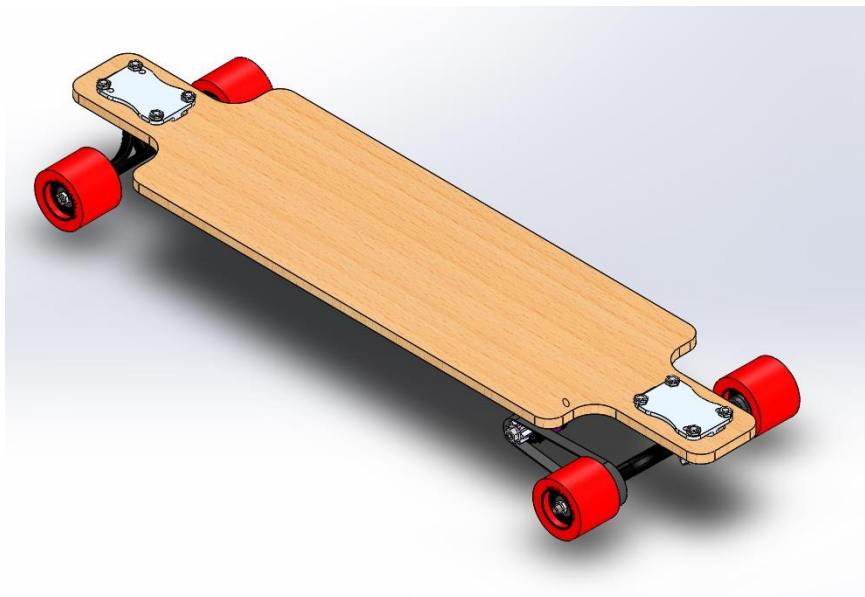


Figura 8.1. Vista superior 3D del longboard.

Com es pot apreciar, l'eix del darrera és més ample ja que s'ha hagut d'inserir l'engranatge que connecta l'eix de la roda posterior esquerra amb el motor.

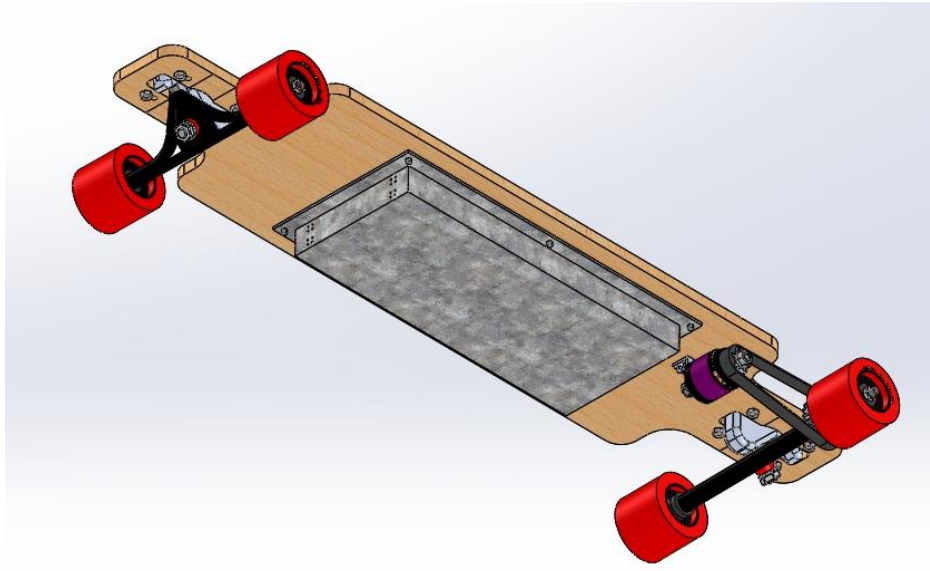


Figura 8.2. Vista inferior 3D del longboard.

Com es pot veure en la figura anterior, el motor va collat a la taula mitjançant una subjecció i va connectat a l'eix de la roda mitjançant un sistema de transmissió per corretja. El motor i el sistema de transmissió haurien d'anar protegits dins d'una carcassa, però aquesta no s'ha dissenyat per poder veure el sistema de forma clara.

En quant a l'electrònica i a la bateria, anirien dins de la caixa que hi ha collada sota la taula del longboard.

8.2. Simulació de la rigidesa.

En aquest apartat es poden veure els resultat de diferents simulacions que s'han per assegurar que la taula de fusta és suficientment rígida com per aguantar el pes de l'usuari sense arribar al límit elàstic de la fusta.

Cal remarcar diferents detalls que s'han de tenir en compte, el primer d'ells és que les taules comercials tenen entre 6 i 8 capes de diferents materials com la fusta d'auró, bambú o fibra de vidre unides amb cola epoxy, que els fa molt resistents. En el disseny 3D s'ha utilitzat una única lamina de fusta d'auró, que és menys resistent que el conjunt de fusta d'auró amb fibra de vidre. També cal considerar que no s'han dissenyat ni afegit les juntes de goma entre la taula de fusta i els components metàl·lics per evitar la ruptura quan s'apliquen tensions en un compost de dos materials amb diferent límit elàstic.

En quant a les dades de la simulació, hi ha dues zones d'encolatge on hi van els eixos del longboard i també hi ha dues zones de tensió on es posen habitualment els peus de l'usuari. La força aplicada és de 840 N repartida en dues zones i representa la força exercida pel pes de l'usuari

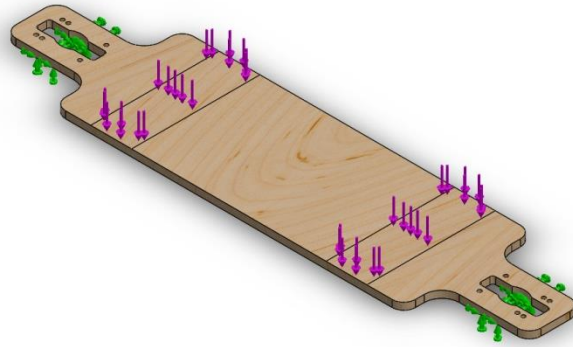


Figura8.3. Ancoratges i forces de la simulació.

El primer assaig realitzat és el d'estrès, es pot apreciar a la Fig. 8.4. que només hi ha tensions en zona on s'uneixen els eixos amb el centre de la taula, però que en cap cas el valor es proper al de ruptura.

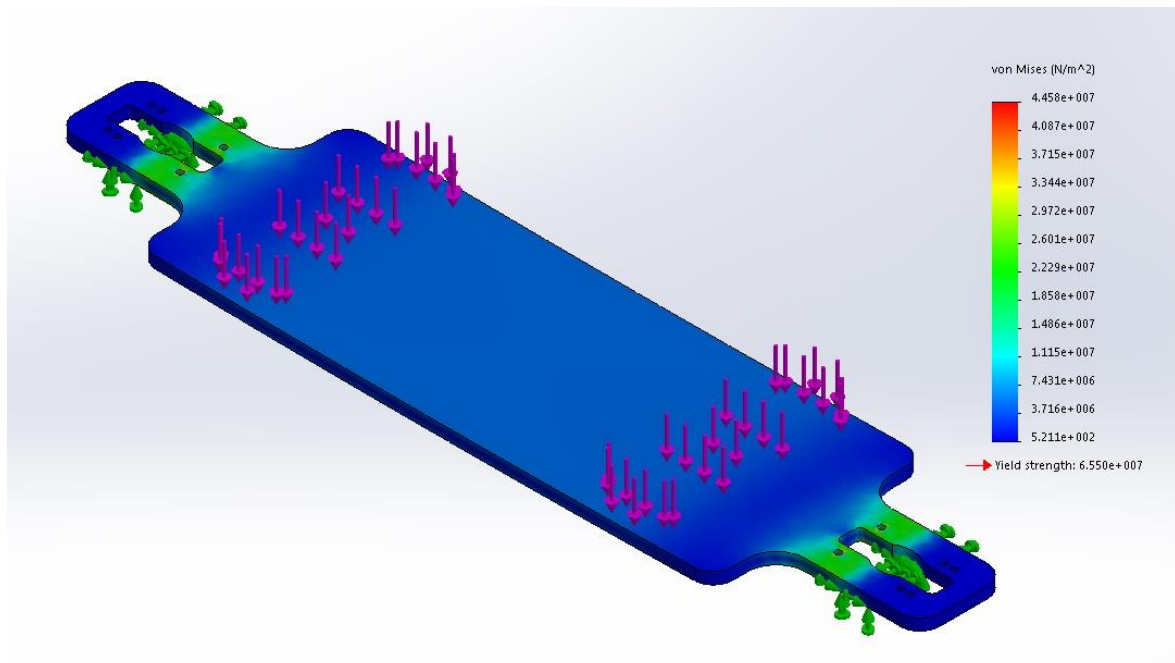


Figura 8.4. Simulació de l'estrès.

El segon assaig fa referència al desplaçament de la taula quan les forces. En aquest assaig és on canvien suaument els resultats, és a dir, si la taula estigués composta de fusta d'auró i fibra de vidre el desplaçament seria menor. Tot i això, els resultats són satisfactoris, ja que el "flex" de la taula és de mens de 3,5mm.

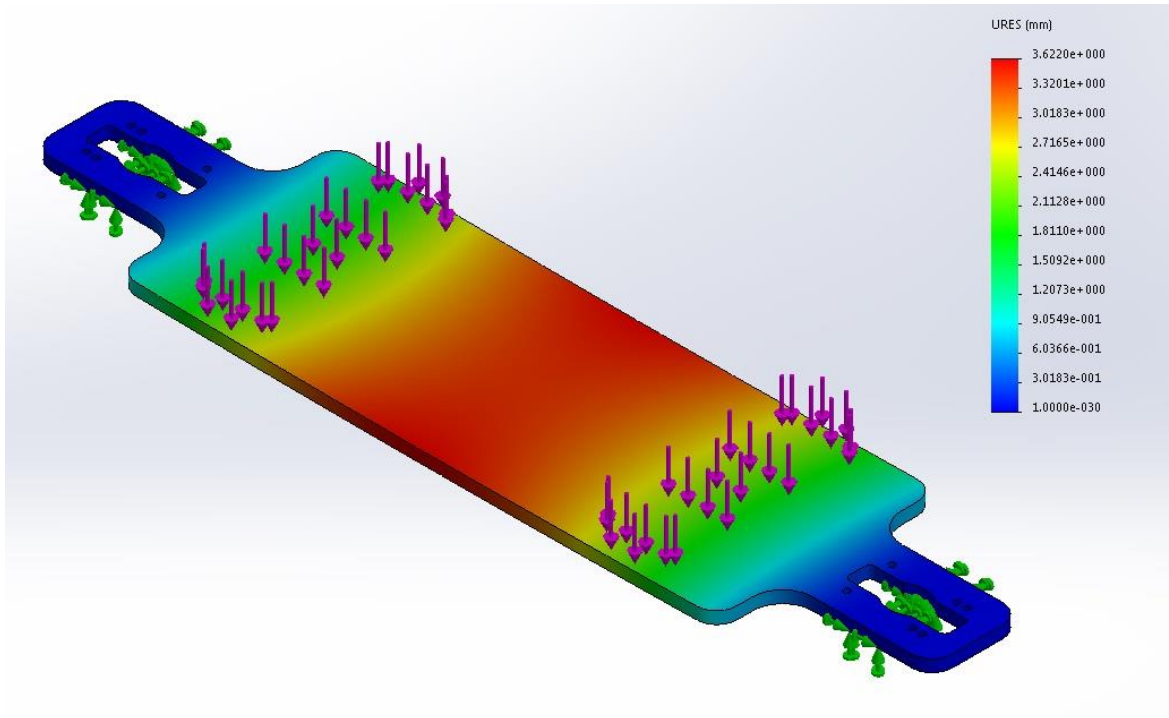


Figura 8.5. Simulació del desplaçament.

9. Especificacions tècniques.

Tot i que l'objectiu principal del projecte és estudiar una solució que permeti propulsar un longboard amb un motor Brushless DC i també recuperar energia mantenint la velocitat en un pendent descendent, en aquest apartat es compararan de forma objectiva els resultats obtinguts en la solució final amb els requeriments proposats en l'avantprojecte.

R és requeriment i D és desig.

Concepte	R/D	Avantprojecte	Solució final
Pes del conjunt	D	Màxim 10 Kg	8,036 Kg
Velocitat	D	25 Km/h	28 Km/h
Potència	D	1500 W	2000 W
Parell	D	5 – 9 Nm	8,275 Nm
Autonomia	D	10 – 15 Km	18, 820 Km

Taula 9.1. Comparativa especificacions tècniques.

Cal dir que en el concepte de pes del conjunt, el valor de la solució real és la suma del conjunt de bateries, el motor i el longboard complert. Falten altres components com el suport del motor, l'engranatge o la caixa de protecció de l'electrònica. Tot i això, no s'espera que aquests components sumin 2 Kg al conjunt.

10. Desviació de la planificació.

En aquest apartat es veurà un resum de la planificació que reflexa la durada de les tasques realitzades i les desviacions que hi ha hagut respecte la planificació inicial.

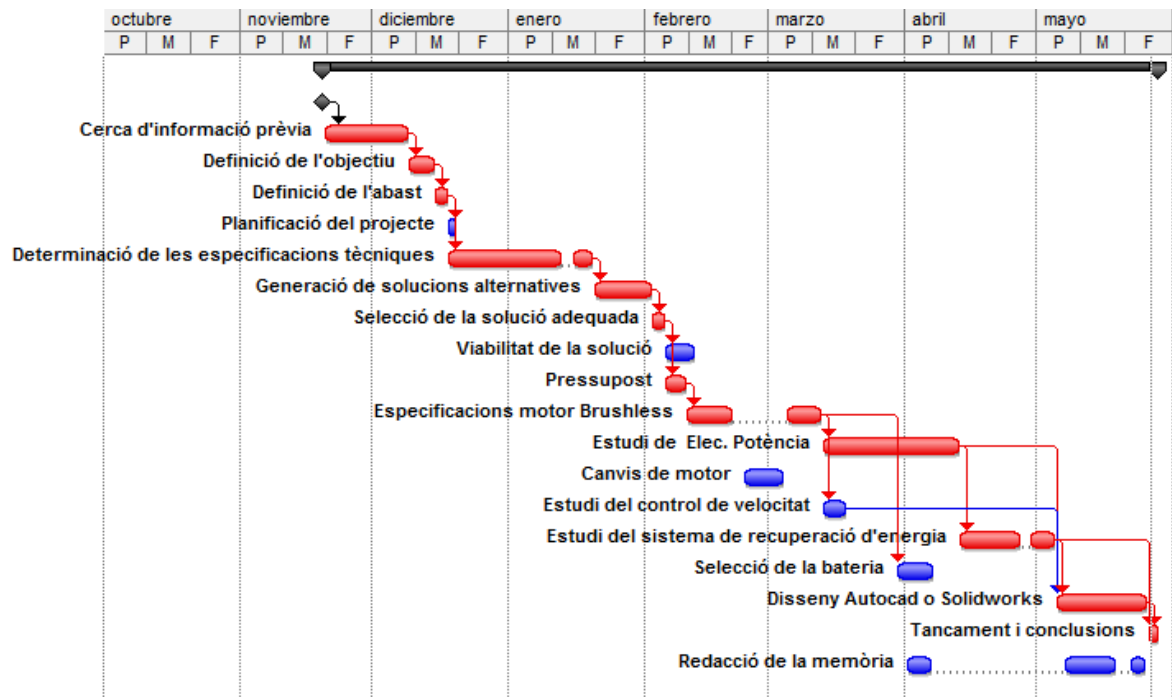


Figura 10.1. Diagrama de Gantt del projecte.

Com es pot veure a la Fig. 10.1. el diagrama de Gantt que reflecteix el resultat de la planificació real no coincideix amb la planificació realitzada a l'avantprojecte. Aquestes diferències són la conseqüència de diferents desviacions al llarg de la realització del projecte. Aquestes desviacions poden ser de diferents tipus:

- Falta d'experiència a l'hora de realitzar la planificació inicial. És a dir, si no s'han realitzat projectes similars amb anterioritat no es té un coneixement de la durada de les tasques.
- Errors en algun càlcul o decisió. Quan hi ha errors en algun punt del projecte i s'han de repetir tasques s'allarga la durada d'aquestes i a conseqüència també s'allarga la durada del projecte si aquesta tasca forma part del camí crític.
- Dependència de tercers. Aquest tipus de desviació no és controlable, per exemple, en el transcurs de la tasca Especificacions motor Brushless es van realitzar els càlculs de necessitats per dimensionar el motor, un cop fet això es va seleccionar un

motor amb aquelles característiques però amb la incògnita de si portava sensors Hall o no i es va preguntar al fabricant. Es van continuar les tasques predecessores, i al cap d'unes setmanes al rebre la resposta del fabricant, que no era l'esperada, es va haver de canviar el motor invertint més temps del previst per la tasca en concret.

11. Desviació del pressupost.

En aquest apartat s'estudiarà de forma més detallada que en l'avantprojecte el cost del projecte, remarcant les desviacions produïdes pels canvis realitzats i treien conclusions d'aquestes desviacions.

Els costos d'inversió calculats en l'avantprojecte on apareixen els costos de tots els apartats del pressupost són els següents:

Costos d'inversió	
Concepte	costos (€)
Projecte d'enginyeria	31.309 €
Amortitzacions	19.874 €
Cost de material del prototip	1.210 €
Cost de muntatge del prototip	900 €
Total costos	53.293 €

Taula 11.1. Costos d'inversió inicials.

Desviacions en els costos d'enginyeria:

En quant al cost d'elaboració del projecte, les variacions venen donades per els canvis en la planificació ja que hi ha desviacions respecte a la planificació inicial.

Elaboració del projecte				
COST D'ENGINYERIA				
Codi	Descripció	Unitats totals	Preu unitari (€)	Import (€)
1.1	Hores destinades a la cerca d'informació	53	45 €	2.385 €
1.2	Hores destinades a la definició de l'objectiu	16	45 €	720 €
1.3	Hores destinades a la definició de l'abast	12	45 €	540 €
1.4	Hores destinades a la planificació del projecte	7	45 €	315 €
1.5	Hores destinades a la determinació de les especificacions tècniques	48	45 €	2.160 €
1.6	Hores destinades a la generació de possibles solucions	39	45 €	1.755 €

1.7	Hores destinades a la selecció de la millor solució	12	45 €	540 €
1.8	Hores destinades a l'estudi de la viabilitat del projecte	18	45 €	810 €
1.9	Hores destinades a la definició del pressupost	10	45 €	450 €
1.10	Hores destinades al càlcul de les especificacions del motor brushless	59	45 €	2.655 €
1.11	Hores destinades a l'estudi de l'electrònica de potència	85	45 €	3.825 €
1.12	Hores destinades a efectuar canvis en el disseny o selecció del motor	30	45 €	1.350 €
1.13	Hores destinades a l'estudi del control de velocitat	15	45 €	675 €
1.14	Hores destinades a l'estudi del sistema de recuperació d'energia	55	45 €	2.475 €
1.15	Hores destinades a la selecció de la bateria	25	45 €	1.125 €
1.16	Hores destinades al disseny en Autocad o Solidworks	60	45 €	2.700 €
1.17	Hores destinades a realitzar el tancament i conclusions	10	45 €	450 €
1.18	Hores destinades a la redacció de la memòria	55	45 €	2.475 €

TOTAL DEL CAPÍTOL	27.405 €
--------------------------	-----------------

Taula 11.1. Costos d'enginyeria.

S'han afegit algunes tasques i s'han allargat algunes altres degut a les desviacions de la planificació ja descrites en el capítol anterior, això fa que els costos d'enginyeria augmentin de forma poc perceptible. El marge del 15% aplicat en aquest apartat de l'avantprojecte té la funció de assumir aquestes desviacions, ja que es podia arribar a un cost de 31 309 €.

Desviacions en les amortitzacions:

En quant a les amortitzacions, si no es realitza físicament el prototip no es poden carregar amortitzacions d'aparells de mesura i d'ajust ja que no s'han utilitzat. També hi poden

haver desviacions degut a que no s'ha emprat alguna eina ja sigui hardware o software que havia estat comptada.

Amortitzacions						
COST EQUIPS INFORMÀTICS I SOFTWARE						
Codi	Descripció	Unitats totals	Preu unitari (€)	Import (€)	Nº anys	€/any
2.3	Ordinador	1	800 €	800 €	3	266,67
2.4	Paquet Office	1	200 €	200 €	3	66,67
2.5	Solidworks	1	6.000 €	6.000 €	3	2000
2.6	Matlab	1	6.000 €	6.000 €	3	2000
TOTAL DEL CAPÍTOL						4.333,33 €

Taula 11.2. Amortitzacions.

Degut a les desviacions comentades anteriorment, el cost de les amortitzacions s'ha vist reduït, és a dir, hi ha marge fins a arribar als 19 874€ estipulats en l'avantprojecte.

Desviacions en el prototip:

El pressupost del prototip teòric varia ja que ara es coneixen més components que a l'inici del projecte i aquests s'han dimensionat correctament.

Prototip		
COST DE MATERIAL		
Codi	Component	Preu (€)
3.1	Longboard (complet)	150,00 €
3.2	BLDC Alien 5065 Sensored Outrunner	67,76 €
3.3	Altres parts electròniques	110,00 €
3.3.1	Mosfet IRL40B215	2,00 €
3.3.2	TI DVR8308	10,60 €
3.3.3	MCU Z8FMC16100	9,21 €
3.4	Bateria High Power Polymer Li-Ion	322,87 €
3.5	Altres components	100,00 €
TOTAL DEL CAPÍTOL (21% IVA)		934,65 €

Taula 11.3. Cost del Prototip.

Com podem veure, inicialment el cost del prototip era de 1 210 €, i finalment el cost es veu reduït.

Per tant, degut a les desviacions del projecte, els costos d'inversió finals s'han modificat i és important que no se sobrepassin els 53 293€ previstos inicialment. El costos d'inversió que caldria fer per obtenir el projecte teòric són els següents:

Costos d'inversió finals	
Concepte	costos (€)
Projecte d'enginyeria	27.405 €
Amortitzacions	4.333 €
Cost de material del prototip	935 €
Cost de muntatge del prototip	900 €
Total costos	33.573 €

Taula 11.4. Costos d'inversió finals.

Com es pot observar en la darrera taula, els costos d'inversió són menors que els proposats en l'avantprojecte. Això vol dir que els marges aplicats han suportat les desviacions i que no se sobrepassa el cost del pressupost inicial.

12. Referències.

- [1] <http://ca.wikipedia.org/wiki/Longboard> dia 26/12/2014 a les 16:00h
- [2] A.E. Fritzegerald, Charles Kingsley, Jr. i Stephen D. Umans, *Máquinas Eléctricas*, Mc Graw Hill 2003.
- [3] Jesús Fraile Mora, *Máquinas Eléctricas*, Mc Graw Hill 2008
- [4] Theodore Wildi, *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*, Pearson 2007
- [5] Salvador Alepuz, “Apunts Electrotècnia”. 2014
- [6] Salvador Alepuz, “Apunts Electrònica de potència”. 2014
- [7] <http://www.4qd.co.uk/> dia 03/02/2015 a les 18:30h
- [8] J.Karthikeyan, Dr.R.Dhanasekaran, *Simulation and implementation of current control of brushless DC motor based on a common DC signal*, International Journal of Engineering Science and Technology
- [9] <http://www.inercia.com/es>
- [10] Reghenzani A., *A Motor Controller For the Solar Car Project*”.The university of Queensland, Octubre 1998.
- [11] http://www.scorpionsystem.com/catalog/discontinued/motor/s55_2/S-5525-170KV/
- [12] Dr. Duane Henselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, Magna Physics Publishing 2003.
- [13] Bilal Akin, Manish Bhardwaj, *Trapezoidal Control pf BLDC Motor Using Hall Effect Sensors*, Application report of Texas Instruments.
- [14] Anònim, *3-Phase Brushless DC Motor Control 120-Degree Trapezoidal Drive with Hall Sensors*, NEC Electronics Corporation 2006.
- [15] David Linden, Thomas B. Reddy, *Handbook of batteries*, Mc Graw Hill 2001.

[16] Álvaro López, *Aprovechamiento de la energía procedente del Frenado regenerativo en Ferrocarriles metropolitanos*, anales de Mecánica y Electricidad 2011.