

Treball final de grau

Estudi: Grau en Tecnologies Industrials

Títol: Disseny i construcció del sistema d'assistència elèctrica del tricicle de càrrega.

Document: MEMÒRIA I ANNEXOS

Alumne: Pavlo Slastion

Tutor: Sergio Herraiz Jaramillo

Departament: Enginyeria elèctrica, electrònica i automàtica

Àrea: Enginyeria elèctrica

Convocatòria (mes/any): Setembre 2015

ÍNDEX

1	INTRODUCCIÓ	4
1.1	Peticionari.....	4
1.2	Antecedents.....	4
1.3	Objecte	4
1.4	Abast	4
1.5	Especificacions.....	5
1.5.1	Especificacions generals de la petició	5
1.5.2	Especificacions del sistema d'assistència elèctrica	7
2	DESCRIPCIÓ CONCEPTUAL	8
2.1	Concepte	8
2.2	Marc legal.....	9
2.3	Sistema d'assistència elèctrica	9
2.3.1	Bateria	9
2.3.1.1	Bateries Pb-àcid	10
2.3.1.2	Bateries Li-ió.....	10
2.3.2	Motor elèctric	11
2.3.2.1	Motor central.....	11
2.3.2.2	Motor de la caixa (motor <i>hub</i>).....	12
2.3.3	Controlador	13
2.3.4	Sensor d'assistència	13
2.3.4.1	Sensor P.A.S.....	14
2.3.4.2	Sensor de parell	14
3	MOTOR BRUSHLESS DC.....	16
3.1	Introducció.....	16
3.2	Construcció i principis de funcionament.....	17
3.3	Estator	18
3.4	Rotor.....	20
3.5	Sensors Hall	20

3.6	Principi d'operació	21
4	CONTROL.....	22
4.1	Introducció.....	22
4.2	Inversor trifàsic	23
4.3	Generació i sensat de la força contraelectromotriu	24
4.3.1	Detecció dels punts de pas per zero	24
4.3.2	Computació dels punts de pas per zero	25
4.3.3	Càlcul d'instants de commutació	27
4.4	Control de corrent.....	28
4.4.1	Control PWM.....	28
4.4.2	Control de velocitat	28
4.4.3	Control de parell.....	29
5	FRENADA REGENERATIVA.....	30
5.1	Fonaments teòrics	30
5.2	Convertidor estàtic/inversor/convertidor bidireccional	31
5.3	L'inversor trifàsic.....	32
6	DESCRIPCIÓ DEL SISTEMA TRIAT.....	34
6.1	Aspectes generals	34
6.2	Objectius del sistema.....	36
6.3	Requeriments del motor.....	36
6.4	Requeriment d'autonomia.....	38
7	SISTEMA D'IL·LUMINACIÓ.....	40
7.1	Introducció.....	40
7.2	Llum de davant	40
7.3	Llums de darrere	41
7.4	Llums intermitents direccionals (de darrere)	43
7.4.1	El flasher	43
7.4.2	El comandament.....	44
7.4.3	Les llums	45

8	CONCLUSSIONS	46
9	RESUM DEL PRESSUPOST.....	47
10	RELACIÓ DE DOCUMENTS	48
11	BIBLIOGRAFIA.....	49
12	GLOSSARI	50
	ANNEX A. CÀLCULS.....	51
	A.1 CÀLCUL DE PERCENTATGE D'ASSISTÈNCIA ELÈCTRICA.....	51
	A.2 TRICICLE A VELOCITAT CONSTANT	53
	A.3 TRICICLE A ACCELERACIÓ CONSTANT	55
	A.4 TRICICLE A VELOCITAT CONSTANT PUJANT PER UNA PENDENT	57
	A.5 ACCELERACIÓ DEL TRICICLE EN UNA PENDENT	59
	A.6 ARRENCADA DEL TRICICLE EN UN TERRENY PLA	61
	A.7 ARRENCADA DEL TRICICLE EN UNA PENDENT	62
	A.8 ESTIMMACIÓ DE CONSUM I D'AUTONOMIA DE LA BATERIA.....	63
	A.9 CÀLCUL DE CONDICIONS DE FRENADA REGENERATIVA.....	68
	ANNEX B. MANUAL D'ÚS.....	70
	ANNEX C. FITXA TÈCNICA MOTOR.....	73

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Peticionari

El peticionari del projecte és l'empresa ECOSOL – Càritas Diocesana de Girona.

Adreça Càritas: Pujada de la Mercè 8, 17004. Girona

Adreça ECOSOL: Carrer Torrents 56, 17001. Girona

1.2 Antecedents

ECOSOL, empresa d'economia solidària vinculada Càritas Diocesana de Girona, té interès en dissenyar i construir un tricicle de càrrega amb assistència elèctrica a fi de realitzar diferents activitats de proximitat, com transportar roba de segona mà, una o dues bicicletes o bé paqueteria diversa.

1.3 Objecte

L'objecte de projecte és dissenyar i construir un sistema d'assistència elèctrica per al tricicle de càrrega.

1.4 Abast

El projecte consisteix en anàlisi de sistemes d'assistència elèctrica existents al mercat, amb la posterior elecció d'un sistema que més s'adequa a les nostres necessitats. També s'explicarà el funcionament del sistema motriu elèctric, i es definirà el disseny del sistema d'il·luminació del tricicle.

1.5 Especificacions

1.5.1 Especificacions generals de la petició

Funcions (Requeriment):

- Mitjà de transport sostenible de mercaderies per l'àrea urbana de Girona. En el disseny es tindrà en compte el fet de poder substituir el tipus de caixa portaequipatges posteriorment.

Trajecte (Requeriment):

- Ha de poder desplaçar-se a qualsevol punt de la ciutat de Girona tenint en compte les limitacions tècniques, com per exemple la potència del motor, la velocitat màxima i l'autonomia de la bateria.

Dimensions i càrrega (Desitjable):

- Longitud: 2700 mm
- Amplada: 1000 mm
- Alçada: 2000 mm
- Pes de càrrega (Tara): 250 kg
- Volum de càrrega: 1,5 m³
- Altura de la càrrega respecte del terra: 360 mm
- Tancament amb doble porta i clau.

Muntatge (Requeriment):

- Els projectistes es comprometen a retornar totes les eines i màquines que li siguin aportades d'altres empreses.
- Dirigir la fabricació de manera que es preservin en tot moment la integritat de les instal·lacions de producció i muntatge.
- Tots els industrials han de seguir estrictament les especificacions dels plànols subministrats pels projectistes.
- Qualsevol incidència que estigui relacionada íntegrament amb el procés de fabricació del tricicle, la responsabilitat recau sobre l'empresa o taller on s'hagi realitzat l'operació corresponent.

- Els projectistes es comprometen a estar presents en tot moment durant el muntatge de les diferents parts del tricicle per tal de procurar que el vehicle es fabriqui segons el disseny establert, així com per prendre decisions si s'ha de realitzar algun canvi.

Reciclatge (Desitjable):

- Es pot utilitzar material reciclat d'altres projectes.
- Posteriors usos del tricicle que surtin de l'abast del propi projecte estaran a càrrec d'ECOSOL - Càrites.

Senyals i control (Requeriment):

- Imprescindible utilitzar tots els sistemes i material de seguretat necessari durant tota operació.

Costos (Requeriment):

- Tots els costos per dur a terme el projecte fins arribar a tenir el tricicle en funcionament no poden superar els 10.000 €, els quals seran aportats per ECOSOL (prèvia conformitat amb les peces i els treballs, i presentació de les factures dels proveïdors i industrials.
- Els projectistes i els directors de projecte es comprometen a no cobrar per les tasques ordinàries (hores de projecte, desplaçaments al voltant de Girona, etc.) però si sorgís la necessitat de despeses extraordinàries ECOSOL s'hauria de fer càrrec del cost (inclosos dins els 10.000 €), tenint en compte que caldria la seva autorització prèvia.

Responsabilitats (Requeriment):

Direcció tècnica, control i certificació del cost del muntatge:

Sra. Elia Muns Montañà, Sr. Ricardo Andrés Vargas, Sr. Xavier Malpica

- Els directors del projecte es responsabilitzen únicament de que els dissenys i els càlculs realitzats pels projectistes garanteixin que el tricicle, un cop fabricat, podrà realitzar la funció que s'ha definit anteriorment. Així mateix, com a representants dels projectistes, garanteixen el seguiment del projecte fins arribar a l'obtenció del prototip final.

- Els industrials que assumeixen les diferents responsabilitats referents a la fabricació del xassís, muntatge de diferents peces de bicicleta/tricicle, caixa portaequipatges i coberta davantera són, respectivament (figura1):



Figura 1. Industrials del projecte

1.5.2 Especificacions del sistema d'assistència elèctrica

De la part de peticionar el sistema d'assistència elèctrica ha de permetre:

1. Realitzar la seva funció durant una jornada laboral de 8h, sense necessitat de carregar la bateria.
2. Assenyalar els canvis de direcció de moviment amb el sistema de llums (disposar de llums direccionals intermitents).

De manera general les especificacions del sistema d'assistència elèctrica instal·lada al tricicle han de complir la Norma UNE-EN 15194:2009+A1 i la normativa de l'ajuntament de Girona la que es refereix a utilització de cicles elèctrics.

2 DESCRIPCIÓ CONCEPTUAL

2.1 Concepte

El concepte d'un tricicle elèctric consisteix, com indica el seu nom, d'un vehicle de tres rodes amb un motor elèctric, encarregat de transformar l'energia elèctrica emmagatzemada en la bateria a l'energia de tracció.

Aquest vehicle és un mitjà de transport molt polivalent, ja que pot transportar paqueteria de tot tipus, amb un límit de volum de $1,5\text{m}^3$ i un pes de càrrega que no ha de superar els 120 kg.

La finalitat d'aquest mitjà és poder arribar a distribuir en zones de les ciutats on amb un furgó convencional és limitat el seu accés, ja sigui per la dificultat de l'amplada dels carrers o per les franges horàries d'accés als barris antics. Per aquest motiu el tricicle és una bona opció ja que és un vehicle silenciós, poc voluminós i de maniobra fàcil.

El sistema d'assistència elèctrica en seu lloc ajuda a realitzar la propulsió del vehicle, d'aquesta manera repartint l'esforç o parell necessari per a moure el tricicle entre el motor i conductor.



Figura 2. Tricicle elèctric

2.2 Marc legal

La solució presentada en aquest projecte ha de correspondre a la norma europea EN 15194:2009+A1:2011 la que proporciona els requisits pels cicles amb assistència elèctrica.

Els punts claus de la norma són els següents:

- El sistema de tracció ha de ser de tipus assistent. Només pot actuar quan es produeix el pedaleig per la part de conductor.
- La velocitat límit fins la que es produeix l'assistència del motor és de 25km/h.
- La potència nominal de motor és de 250W.
- La tensió límit del sistema és de 48V.

2.3 Sistema d'assistència elèctrica

El sistema d'assistència elèctrica és un conjunt d'elements instal·lats al tricicle amb el fi de realitzar la tasca d'ajut o assistència al conductor a l'hora de moure el vehicle. Encara que existeixen diferents tipus de sistemes en general tots es componen de components principals següents: bateria, motor elèctric, controlador, sensor d'assistència.

2.3.1 Bateria

La bateria és el component responsable d'emmagatzematge d'energia elèctrica necessària, per un costat, per a alimentar el motor elèctric, i per altre costat, per a fer funcionar els sistemes auxiliars, com poden ser llums, display, etc.

A l'hora d'escollir un acumulador d'energia s'ha de tenir en compte les característiques següents:

- Voltatge: la tensió de funcionament del sistema.
- Resistència als cicles: el factor que defineix la duració de vida d'una bateria.
- Energia específica: l'energia que subministra la bateria per unitat de pes.
- Seguretat i fiabilitat: condicions de funcionament segur.
- Cost: factor econòmic.

Actualment existeixen varis tipus de bateries, basades en utilització de diferents elements per a produir l'electricitat a partir de reaccions químiques. Els tipus més utilitzats són bateries de plom-àcid i de liti-ió.

2.3.1.1 Bateria Pb-àcid

Aquest tipus de bateries és amplament utilitzat al món d'automoció convencional i als vehicles elèctrics de tipus elevadors, filoguiats, etc.

El model actual més avançat és una bateria segellada del tipus regulada per vàlvula, amb electròlit immobilitzat en un separador absorbent de microfibres de vidre o amb electròlit gelificat. Aquest tipus de bateries, en condicions normals d'ús, no gasifica degut a que l'oxigen generat en la placa positiva es recombina en la placa negativa, evitant el despreniment d'hidrogen en aquesta placa.

Se tracta d'una tecnologia provada i segura, que es recicla gairebé en 100%. D'altres avantatges és pot destacar e seu cost relativament baix i la durada de vida que pot arribar a ser més de 500 cicles. El gran inconvenient d'aquest tipus de bateries és el seu pes que és força gran i conseqüentment tenen el baix valor d'energia específica.

2.3.1.2 Bateria Li-ió

Són les bateries més utilitzades actualment. El principi de funcionament consisteix en que el liti de l'elèctrode negatiu emigra com catió a través de l'electròlit al elèctrode positiu, el que en seu lloc està format per òxids de metalls de transició com el cobalt o níquel que tenen la propietat d'intercalar el liti en la seva estructura d'una manera reversible.

Les característiques més importants de bateries de Li-ió són els valors elevats d'energia específica i llarga vida útil (aproximadament de 1.000 cicles). Els punts crítics és el seu cost bastant alt i la seguretat ja que són força sensibles als xocs.

2.3.2 Motor elèctric

La gran majoria de sistemes existents al mercat utilitzen els motors elèctrics de tipus *brushless DC*, o sigui motors de corrent continua sense escobretes. Els principis de funcionament i comparació amb els motors de corrent continua convencionals està explicat al capítol següent.

Existeixen dos grans famílies de motors que es diferencien entre ells per tipus de transmissió i consegüentment per lloc de col·locació: motor central i motor de caixa de la roda.

2.3.2.1 Motor central

En aquest tipus de sistema d'assistència el motor s'instal·la a la part central de la transmissió, o sigui està unit al mecanisme de plat-biela del tricicle (figura 3). D'aquesta manera el motor actua directament al plat, igual com el conductor que realitza la mateixa funció mitjançant els pedals.

Físicament el sistema de motor central inclou no només el motor, sinó també el controlador, el sistema d'engranatges, i els sensors de parell i de velocitat. És un conjunt bastant compact ja que el sistema d'engranatges permet reduir les dimensions del motor.



Figura 3. Motor central (<http://www.bosch-ebike.de>)

2.3.2.2 Motor de la boixa (motor *hub*)

Aquest tipus de motor està unit directament amb a la roda del vehicle. Al cas de bicicletes pot estar instal·lat a la roda davantera com de darrere. Constructivament és un motor invers, on l'estator és la part interna i queda fix a l'eix de la roda, i el rotor és la part externa i gira amb la roda. Existeixen dos tipus de motors de la boixa: motors directes i motors amb un sistema planetari d'engranatges.

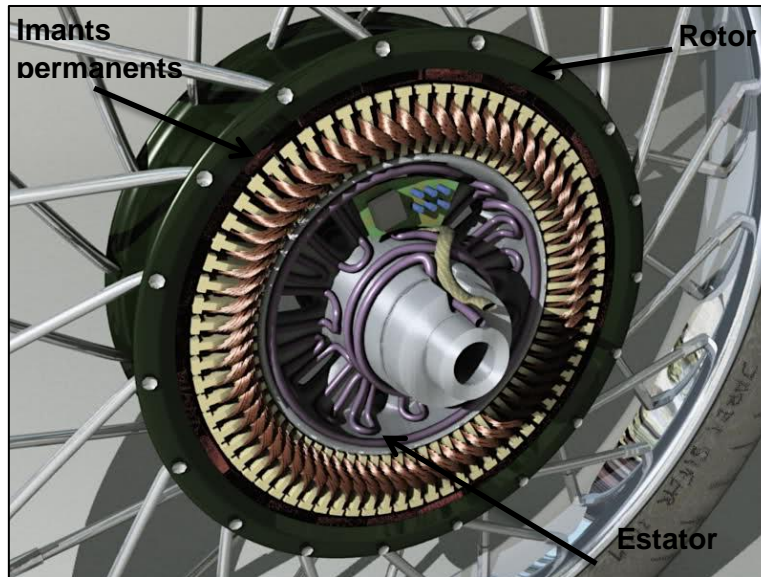


Figura 4. Motor directe (MORCHIN, 2006)

El motor directe mecànicament sempre està unit a la roda com es pot veure a la figura 4, i això implica el gir del rotor als moments quan el motor no actua i per això una lleugera resistència al gir. Normalment són els motors de diàmetre i de pes més gran que altres tipus, ja que han de poder proporcionar la potència de sortida elevada (quan sigui necessari) al cas de velocitat baixa. El gran avantatge d'aquest tipus de sistemes és la possibilitat d'incorporació de la funció de la frenada regenerativa, el principi de funcionament de la qual està explicat al capítol corresponent.

Els motors amb engranatges van ser els primers en aparèixer, i estan basats en el fet de que els motors *brushless* són més eficients a l'hora de funcionar amb velocitats altes. El motor es col·loca dins del sistema de transmissió de tipus planetari, d'aquesta manera li permet girar ràpidament, però transmetre a la roda velocitat reduïda a través dels engranatges, tal i com s'observa a la figura 5. Tot això fa que el motor tingui les dimensions i el pes més petites proporcionant la mateixa potència.

Més a més hi està incorporada la funció de gir lliure, o sigui que la roda pot girar lliurement sense arrossegar el rotor, en diferència del motor directe. Però per la mateixa raó ja no poden realitzar la funció de la frenada regenerativa.

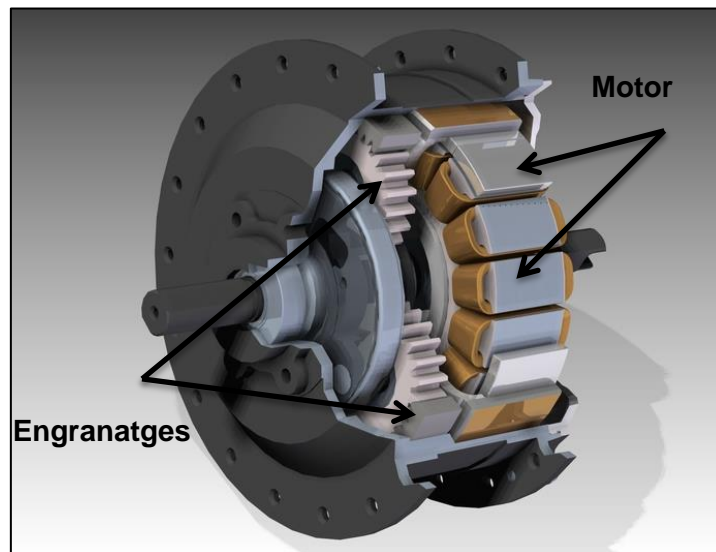


Figura 5. Motor amb engranatges (MORCHIN, 2006)

2.3.3 Controlador

El controlador és un aparell electrònic que envia cap al motor i regula l'energia elèctrica, proporcionada per la font d'alimentació (bateria). Es pot dir que fa el paper del 'cervell' del sistema, llegeix les dades dels sensors i del comandament (que pot ser un display) i realitza l'alimentació del motor de manera que actuï adequadament. El fonaments teòrics del control del motor *brushless* està explicat al capítol corresponent.

Normalment els fabricants dels motors també proporcionen els controladors que tenen en compte les característiques funcionals del mateix, d'aquesta manera realitzant el control més eficient del funcionament de tot sistema. Els sistemes de motor central porten el controlador dins de la caixa del motor, en canvi als sistemes *hub* és un component extern i ha de ser col·locat a un lloc adequat pel mateix usuari.

2.3.4 Sensor d'assistència

La necessitat d'incloure aquest tipus de components al sistema prové del marc legal, ja que es demana que el motor només actuï a l'hora de pedalar i deixi de funcionar un

cop s'hagi deixat de pedalar. En total, el sistema ha d'incorporar un o varis elements que detectin el procés de pedaleig.

Principalment existeixen dos famílies de sensors d'assistència: sensor de pedaleig o P.A.S, i sensor de parell.

2.3.4.1 Sensor P.A.S

Els sensor d'aquest tipus consisteix de varis imants, situats dins del plat dels pedals, tal i com s'observa a la figura 6. A l'interior del plat hi ha un sensor d'efecte Hall que detecta el camp magnètic. Al moure el plat amb imants el sensor produeix la senyal, que s'envia cap al controlador.

La simplicitat i el baix cost d'aquest aparell fan que sigui el tipus de sensor més utilitzat en les aplicacions de bicicletes i tricicles elèctrics. El gran inconvenient d'aquest sensor és que el conductor ha de realitzar una volta completa de pedals per a que es pugui detectar el moviment.



Figura 6. Sensor P.A.S (MORCHIN, 2006)

2.3.4.2 Sensor de parell

És la classe de sensors que ha aparegut al mercat relativament fa poc de temps. Com ho indica el seu nom, aquest tipus de sensor detecta el parell o l'esforç realitzat pel conductor gracies a la mesura de torsió a través de l'eix de la caixa de pedalier. Per a fer això, utilitza un anell indicador al centre amb petites ranures calibrades i una bobina que llegeix aquest anell, com es pot veure a la figura 7. És un sensor molt sensible i precís, i fa la seva funció sense contactes mecànics que podrien causar la fricció i dificultat per pedaleig.

És un sistema que resulta un control més intel·ligent, ja que permet que el motor sempre faci un percentatge concret de l'esforç necessari. El inconvenient principal d'aquest sensor és el seu cost, normalment força elevat.

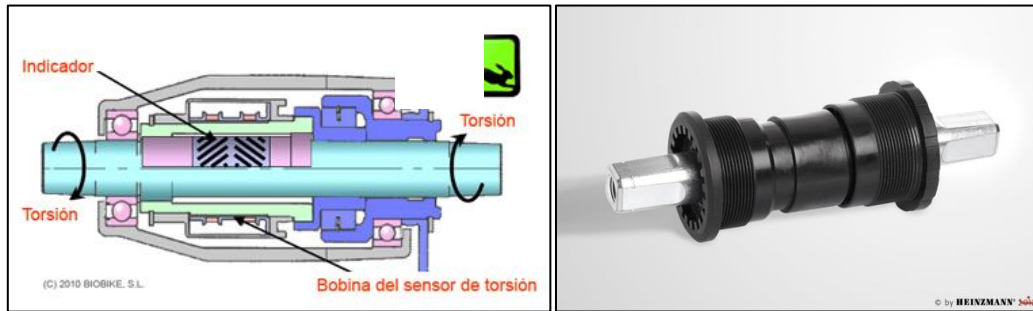


Figura 7. Sensor de parell (MORCHIN, 2006)

3 MOTOR BRUSHLESS DC

3.1 Introducció

Avui en dia els motors de corrent continua sense escobretes o motors *brushless* formen una part important dins del món de motors elèctrics. El seu ús dins dels sectors d'automoció, aeroespacial, mèdic, sistemes d'automatització industrial, etc., ha augmentat molt durant últims anys gràcies a moltes avantatges comparant amb els motors de corrent continua amb escobretes o els motors d'inducció.

Els motors de corrent continua convencionals (amb escobretes o *brushed*) són eficients, tenen una relació parell-velocitat lineal i el seu control és relativament fàcil. Però el gran inconvenient és la presència d'escobretes, o sigui la commutació mecànica, la cosa que porta necessitat de manteniment periòdic i recanvi d'escobretes. Més a més hi tenen lloc altres aspectes no desitjables com soroll acústic, espurnes o separació de partícules de carboni.

El motor *brushless DC* realment és la màquina síncrona amb imants permanents. Com ho indica el seu nom, és un motor que s'alimenta de corrent continu, però no porta escobretes, la commutació es realitza mitjançant el control electrònic. Els instants de la commutació es detecten mitjançant diferents tècniques que poden emprar o no uns sensors que poden ser de diferents tipus: encoders o més sovint sensors d'efecte Hall. De manera general l'avanç del sector de components electrònics ha permès als motors *BLDC* ocupar el lloc dels motors DC convencionals, ja que tenen els avantatges següents en comparació amb els últims:

- Llarga vida útil.
- Alta resposta dinàmica.
- Alt rendiment.
- Millor relació parell-velocitat.
- Funcionament silencios
- Major rang de velocitat.
- Major relació entre parell entregat i la massa i les dimensions del motor.

3.2 Construcció i principis de funcionament

El funcionament d'un motor síncron convencional es pot descriure en general de la següent manera:

1. L'estator, el debanat d'armadura s'alimenta amb el corrent trifàsic per crear un camp magnètic rotatiu.
2. Al rotor hi ha uns imants permanents que creen el camp magnètic del rotor.
3. Els dos camps magnètics de l'estator i del rotor interactuen i generen un parell que fa girar l'eix.
4. Degut a l'aparició dels camps magnètics rotatius, es genera una FEM induïda a cada fase del debanat de l'estator.

Altre aspecte important és que en la màquina síncrona no hi ha lliscament necessari per crear un camp magnètic a l'estator, d'aquesta manera els gir del rotor (igual que el camp magnètic corresponent) està sincronitzat amb el gir del camp magnètic d'estator, tal i com s'expressa a l'Equació 1:

$$n_r = n_s = \frac{60}{\text{poles} / 2} \cdot f_s \quad (\text{Eq.1})$$

On:

Poles – número de parells de pols

f_s – freqüència de corrent d'alimentació en Hz

n_r, n_s – velocitat angular de rotor i del camp d'estator en rpm

Doncs, el motor *BLDC* és un motor síncron però es diferencia del convencional en que utilitza uns detectors de posició del rotor i un inversor per a controlar els corrents d'armadura. A la figura 8 es pot veure l'estructura d'un motor *brushless* convencional.

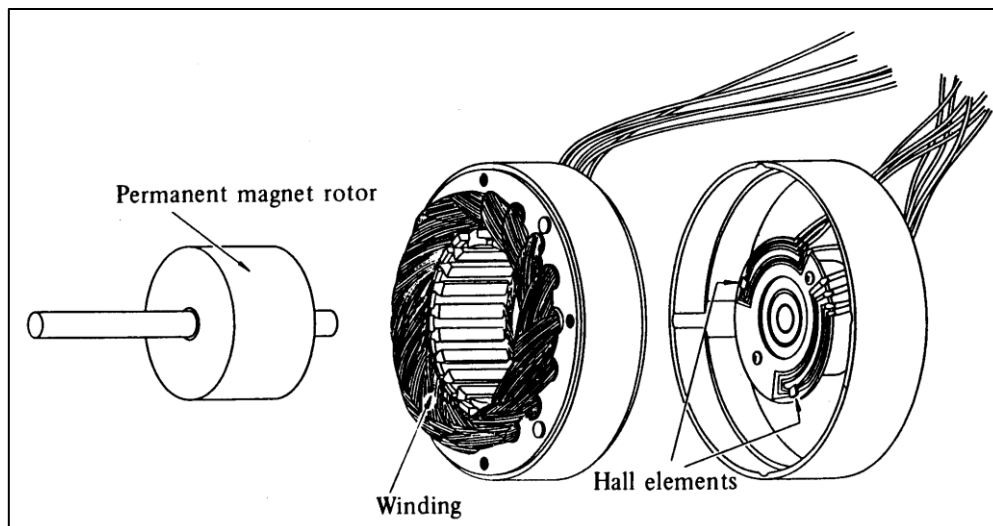


Figura 8. Motor brushless convencional (KARUNAKARAN, 2008)

3.3 Estator

L'estator d'un motor *BLDC* està format per làmines apilades d'acer i els debanats col·locats en ranures al llarg de la cara interna de l'estator.

Cada un d'aquets debanats es construeix amb nombroses bobines que es col·loquen a les ranures (una o més per a cada ranura) i s'interconnecten per formar el mateix debanat. Finalment cada debanat es distribueix a la perifèria de l'estator per a formar un nombre parell de pols. La figura 9 representa l'estator de motor tipus de la caixa de la roda (imatge d'esquerra) i motor convencional (imatge de dreta).

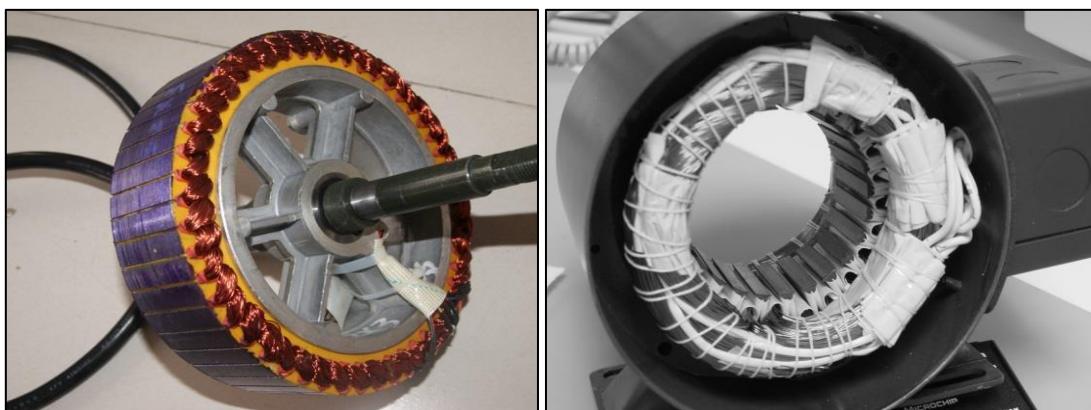


Figura 9. Estator del motor brushless

En la majoria dels motors *BLDC* a l'estator n'hi ha tres debanats connectats en estrella o en triangle, tal i com s'observa a la figura 10.

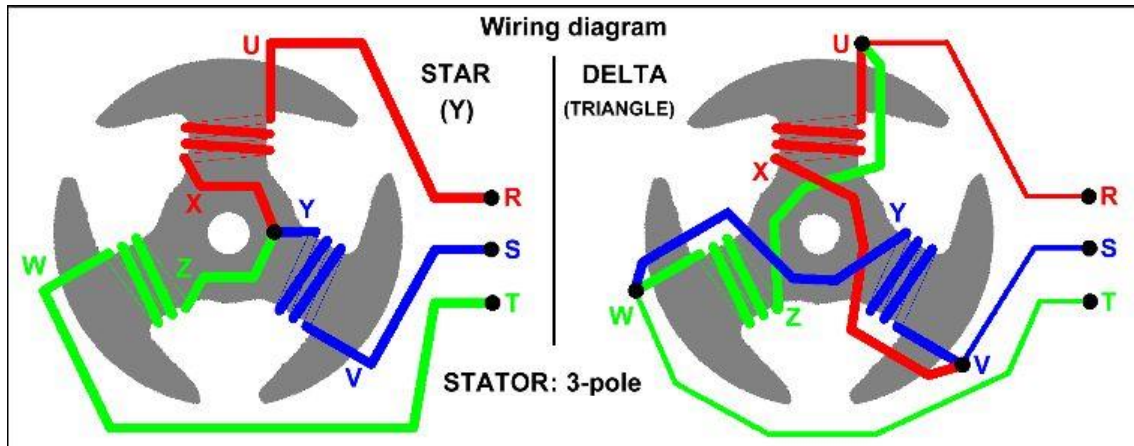


Figura 10. Tipus de connexions del debanat (BUCHI, 2010)

En funció de la distribució i de la forma d'alimentació dels debanats d'estator es diferencien dos principals tipus de motors sense escobretes: trapezoïdal i sinusoidal, com es pot veure a la figura 11.

Com indica el seu nom al motor de tipus trapezoïdal s'indueix la força contraelectromotriu que té la forma trapezoïdal i cada fase del motor s'ha d'alimentar amb impulsos rectangulars de corrent (*quasi-square current*) desfasats amb 120° . En canvi al motor de tipus sinusoidal la força contraelectromotriu és de la forma sinusoidal igual que el corrent d'alimentació de les fases de l'estator. Aquets últims requereixen els sensors de posició molt precisos, perquè és necessari saber la posició del rotor a cada instant de temps pel seu òptim funcionament. Això fa que el parell a la sortida dels motors sinusoidals és més suau, però el seu control és més complex i per això tenen un cost més elevat

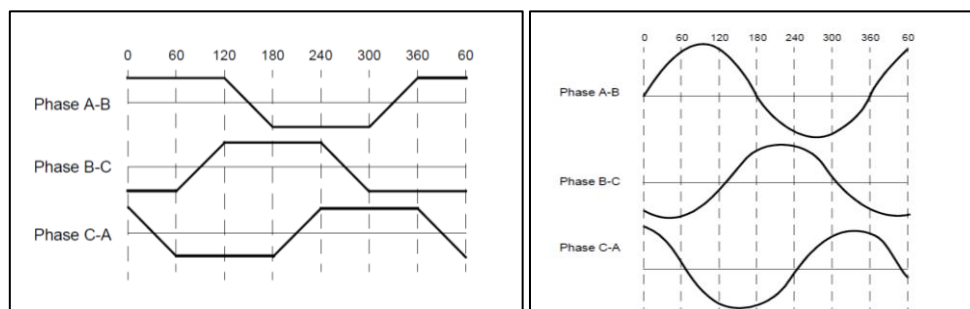


Figura 11. Formes de força contraelectromotriu (BALDURSSON, 2005)

3.4 Rotor

El rotor d'un motor *brushless* està format per imants permanents que poden variar de dos a vuit parells de pols que es alternen Nord (N) i Sud (S).

Els imants de ferrita tradicionalment són els més utilitzats en la fabricació dels rotors. Tenen un avantatge en que el seu cost és relativament baix, però per altra banda ferrita té la densitat de flux magnètic baixa per un volum determinat. Per això cada vegada més sovint s'utilitzen els aliatges de terres rares que tenen alta densitat magnètica per unitat de volum, lo que permet reduir les dimensions del rotor per a crear el mateix parell.

Alguns exemples d'aquests aliatges són el Neodimi (Nd), Samari Cobalt (SmCo), i el Neodimi Ferro Bor (NdFeB).

3.5 Sensors Hall

Com ja s'havia comentat abans, als motors *BLDC* es realitza la commutació electrònica en canvi dels motors de corrent continua on la commutació és mecànica, mitjançant els escobretes. Doncs, per a girar el motor s'ha de saber la posició del rotor i activar els debanats de l'estator a l'instant quan sigui necessari, amb la seqüència correcta. Els sensors Hall detecten la posició del rotor i ho comuniquen al controlador que al seu lloc decideix els instants i la polaritat d'alimentació de cada debanat.

La majoria dels motors *brushless* tenen tres sensors Hall instal·lats a l'estator. Cada cop que els pols magnètics del rotor passen a prop del sensor, donen una senyal que indica si és un pol N o S. Basant-se en la combinació d'aquestes tres senyals, es pot determinar la seqüència exacta de commutació. Físicament els sensors poden estar desfasats entre ells 60° o 120° , tal i com es veu a la figura 12.

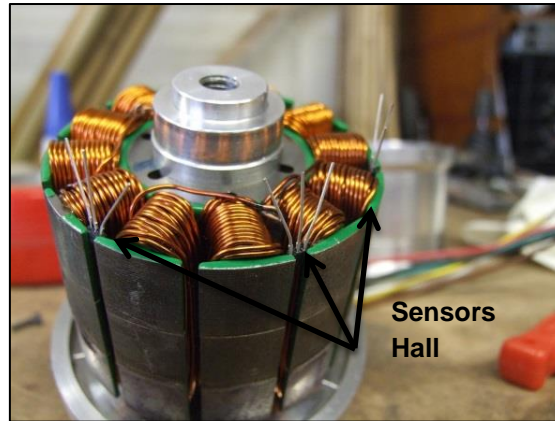


Figura 12. Sensors Hall

3.6 Principi d'operació

El principi de funcionament d'un motor *BLDC* trifàsic bàsicament consta d'una activació bifàsica, o sigui al mateix temps només dues fases (debanats) estan alimentades mentre la tercera no ho és. Activació de dues fases concretes a cada instant depèn de la posició del rotor, la que pot ser detectada pels sensors Hall o per les tècniques que no utilitzen sensors.

La commutació es realitza mitjançant un inversor trifàsic de sis interruptors.

El corrent passa per cada fase durant un període de 120° elèctrics quan la BEMF és constant, tal i com s'observa a la figura 13. D'aquesta manera la commutació es produeix cada 60° (elèctrics).

Doncs, físicament resulta que cada interval comença quan les línies del camp de l'estator i del rotor estan separades a 120° i acaba quan ho estiguin a 60° . El parell màxim es produeix quan les línies són perpendiculars.

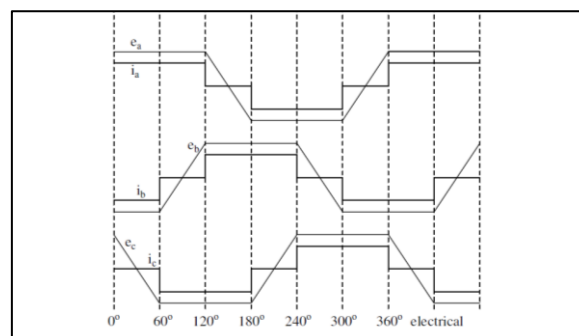


Figura 13. Sincronització del corrent amb la BEMF (BALDURSSON, 2005)

4 CONTROL

4.1 Introducció

Ja que l'activació de debanats ha de ser síncrona amb la posició del rotor, l'ús de sensors és el més comú per aquest tipus de motors. Però per les qüestions de cost, fiabilitat i facilitat de muntatge a vegades és més desitjable usar els motors que no porten sensors, o sigui amb el principi de funcionament *sensorless*.

Al nostre cas disposem d'un motor Crystalyte HT 2425 que no fa servir els sensors per la seva operació.

Esquemàticament el control d'un motor *brushless* es pot representar de manera, tal i com s'observa a la figura 14:

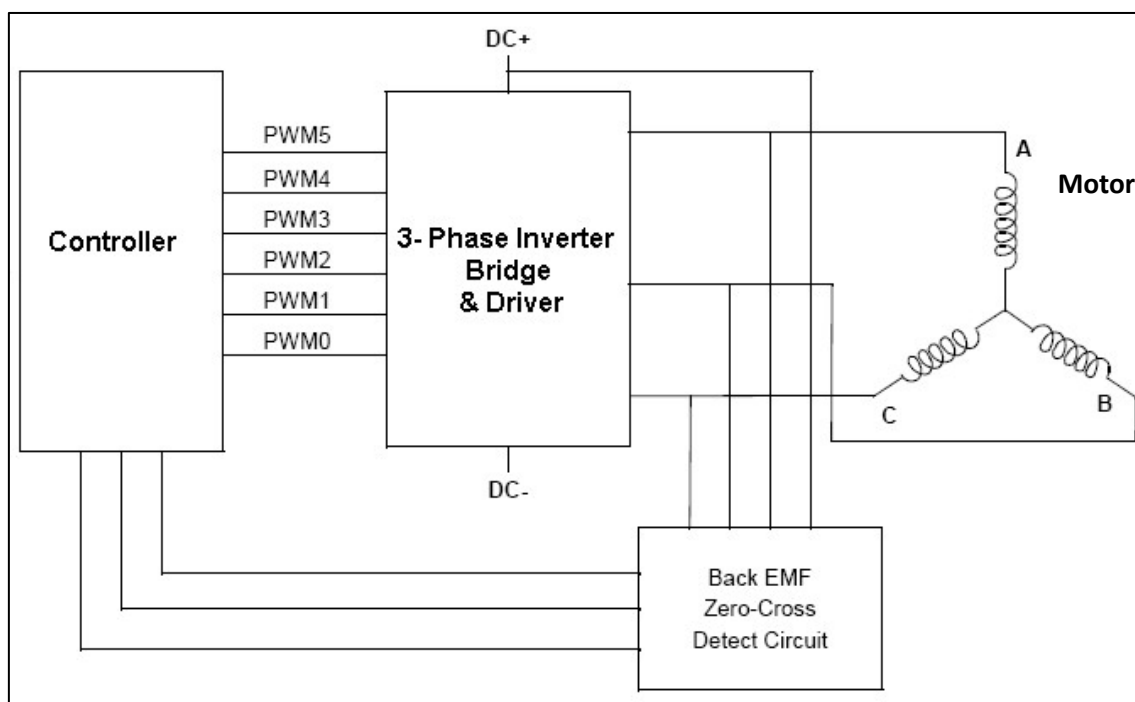


Figura 14. L'estructura de control del motor brushless (KARUNAKARAN, 2008)

El sistema motor-controlador principalment consisteix de quatre elements: motor, inversor trifàsic, unitat de control, circuit de detecció de la BEMF. Físicament l'inversor, unitat de control i circuit estan dins del controlador. La construcció i el principi de funcionament d'un motor *brushless* està descrit al capítol anterior, i en canvi en aquest

capítol s'explica més en detall l'operació d'altres components del sistema que formen el control.

4.2 Inversor trifàsic

Els inversors de voltatge són els aparells que converteixen corrent continua a corrent alterna trifàsica i són els elements claus pel funcionament dels motors síncrons.

La figura 15 representa un inversor simplificat connectat al motor, on interruptors estan implementats per uns transistors bipolars, encara que més comuns són els transistors MOSFET o els bipolars de porta aïllada (IGBT).

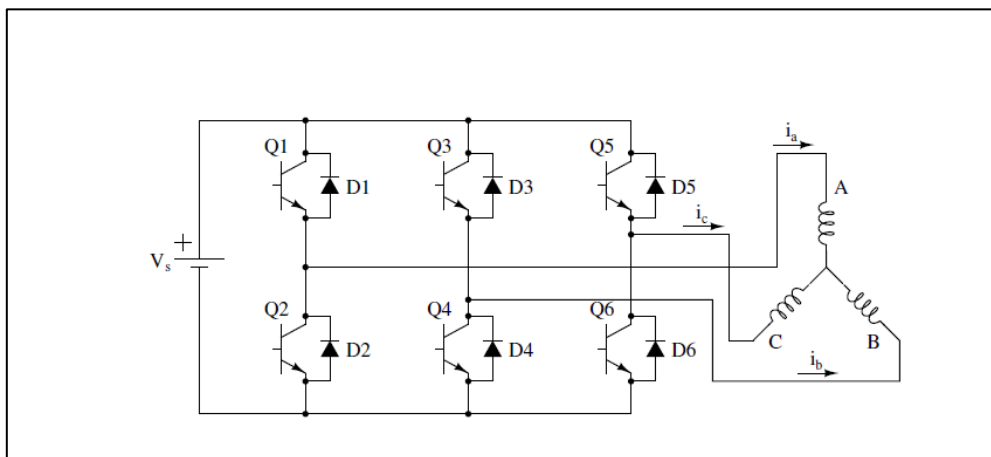


Figura 15. Inversor trifàsic (BALDURSSON, 2005)

En general el motor s'alimenta per un inversor amb un control de corrent. La tasca d'aquest control consisteix en dos operacions independents: sincronització dels fluxos de rotor i d'estator i regulació de la magnitud d'intensitat. O sigui, controlar la seqüència d'activació d'interruptor (per a alimentar dues fases necessàries) i controlar corrent per a obtenir la velocitat i parell desitjat.

La part de sincronització de fluxos, com ja s'havia mencionat abans, està implementat per una tècnica de control *sensorless*.

4.3 Generació i sensat de la força contraelectromotriu

En el motor a l'hora de rotar, per la llei de Lenz a cada debanat es genera una força contraelectromotriu que s'oposa al voltatge aplicat. Principalment aquesta força està en funció de tres paràmetres del motor:

- El nombre de espirals del debanat.
- La velocitat angular del rotor.
- El camp magnètic generat pels imants permanents del rotor.

El sensat de la força contraelectromotriu induïda proporciona una informació que pot ser analitzada per obtenir informació sobre la posició del rotor.

4.3.1 Detecció dels punts de pas per zero

Als motors sense escombretes el flux magnètic de l'estator ha de anar 90° elèctrics més endavant que el del rotor per produir el màxim parell. Per la mateixa raó els corrents que passen per cada debanat han de ser en fase amb les forces contraelectromotrius, tal i com s'observa a la figura 16.

Les tensions de fase de les fem són simètriques respecte 0V. Aquest fet suposa un gran avantatge ja que permet conèixer els instants d'intersecció amb la tensió de 0V.

Es produeixen sis passos per 0 de les fems: 0, 60, 120, 180, 240, 300, 360° elèctrics. La commutació ha de produir-se a 30, 90, 150, 210, 270, 330° és a dir 30° després de que hi hagi un punt d'intersecció amb 0V de la fase no alimentada. Bàsicament el algorisme de commutació de sis passos consisteix en detectar aquests punts d'encreuament amb zero, calcular el temps que tardarà el rotor en recórrer 30° i realitzar la commutació en aquell instant.

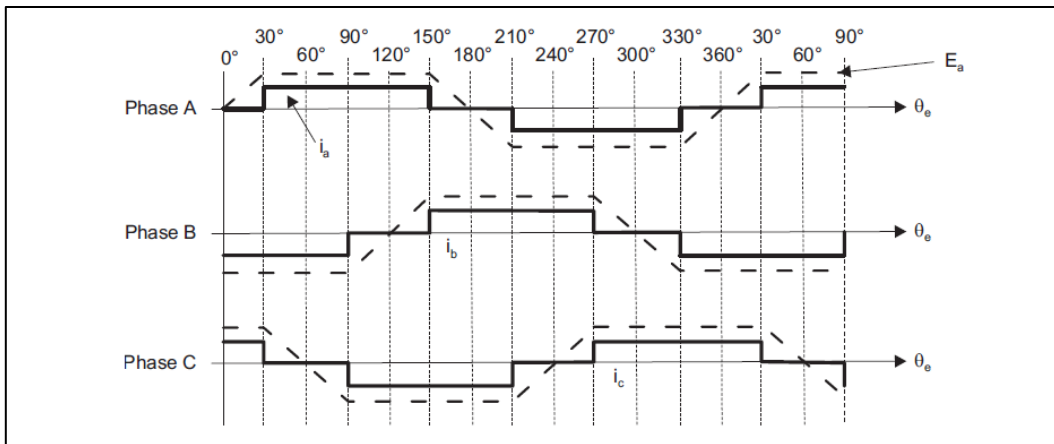


Figura 16. Les formes de corrent (línia contínua) i de la BEMF (línia discontinua) respecte la posició (AKIN, 2013)

4.3.2 Computació dels punts de pas per zero

Els instants de pas de les fem per 0V poden ser detectats per diferents tècniques. En aquest treball veurem un dels mètodes més comuns (ja que el fabricant no proporciona informació sobre la tècnica que s'utilitza) que és comparació de la força contraelectromotriu amb la tensió del punt neutre.

El punt neutre físicament no està disponible a la majoria dels motors *BLDC*, però el valor de tensió d'aquest punt pot ser calculat per software del controlador. El model elèctric d'una fase de l'estator es pot observar a la figura 17.

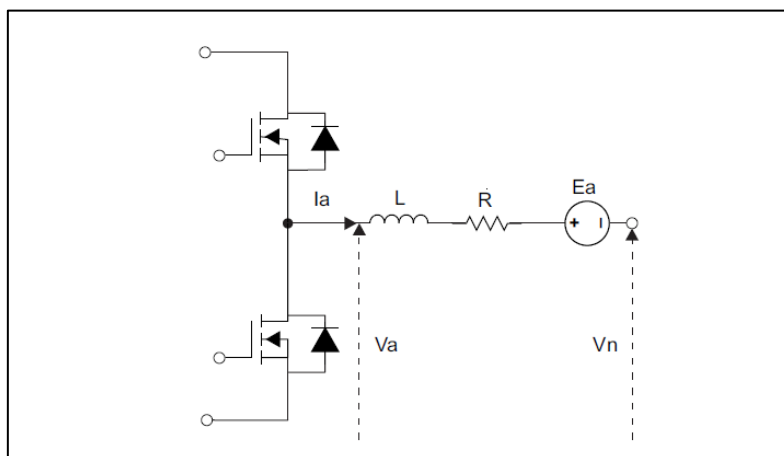


Figura 17. El model elèctric de la fase de l'estator (AKIN, 2013)

Assumint que la fase C no està alimentada, es pot definir les equacions per calcular els voltatges de cada fase:

$$V_a = RI_a + L \frac{dI_a}{dt} + E_a + V_n \quad (\text{Eq.2})$$

$$V_b = RI_b + L \frac{dI_b}{dt} + E_b + V_n \quad (\text{Eq.3})$$

$$V_c = E_c + V_n \quad (\text{Eq.4})$$

On:

R – resistència per fase en Ohms

L – inductància per fase en Henrys

E – força contraelectromotriu en Volts

I – intensitat de fase en Ampers

V_n – voltatge del punt neutre (connexió estrella) respecte terra en Volts

Com que a cada instant corrent passa només per dues fases, tenim que:

$$I_a = -I_b \quad (\text{Eq.5})$$

D'aquesta manera, sumant les tensions de cada fase, obtenim:

$$V_a + V_b + V_c = E_a + E_b + E_c + 3V_n \quad (\text{Eq.6})$$

Com podem observar a la figura 16, als instants d'intersecció de les fems amb 0V, la suma dels valors de les BEMF és igual a zero. Doncs, la última equació es redueix fins:

$$V_a + V_b + V_c = 3V_n \quad (\text{Eq.7})$$

D'aquesta manera, s'obté l'equació que serà implementada al codi per a calcular la tensió neutre.

Finalment, per la fase no alimentada (al nostre exemple és la fase C), podem trobar el valor de la BEMF:

$$3E_c = 3V_c - 3V_n \quad (\text{Eq.8})$$

Aquesta equació també serà implementada al codi per a calcular els punts de creuament. De la mateixa manera s'han de buscar els punts per les fases A i B.

4.3.3 Càlcul d'instants de commutació

Com ja s'havia dit abans els instants de commutació estan desplaçats a 30° elèctrics dels punts d'intersecció, doncs és necessari trobar el temps que porta el rotor a transcórrer aquets angle. Al software això està implementat de la forma següent: T és el temps que tarda el rotor a realitzar una volta anterior i α és l'angle de retard desitjat (al nostre cas és de 30°). Llavors, per a obtenir el període de temps necessari s'ha de dividir l'angle α per 360° i multiplicar-lo per T, tal i com s'expressa a l'Equació 9.

$$\text{Time delay} = T \cdot \left(\frac{\alpha}{360}\right) = v_timer \cdot Ts \cdot \left(\frac{\alpha}{360}\right) = v_timer \cdot Ts/12 \quad (\text{Eq.9})$$

On:

Time delay – temps que tarda el rotor en girar els 30° en segons

v_timer – és el temporitzador que compta el número de cicles de mostreig

Ts – és el temps de període de mostreig en segons

4.4 Control de corrent

4.4.1 Control PWM

Ja sabem que el motor s'alimenta per un inversor trifàsic amb un control de corrent, què regula el pas d'intensitat per dues fases de l'estator al mateix temps (activació bifàsica). La velocitat i el parell depenen del camp magnètic generat al debanat de l'estator que al seu lloc depèn del corrent que hi passa. Doncs, regulant la tensió i corrent de fase es pot aconseguir a controlar la velocitat i parell proporcionat pel motor. Existeix dos tipus de controladors de corrent: PWM i control de histèresis.

El PWM està basat en comparació de la senyal triangular de una freqüència concreta amb l'error de la senyal a controlar, tal i com s'observa a la figura 18. Aquest error s'obté de la resta del valor de referència i del valor actual. La comparació resulta en una senyal de control que s'envia a l'entrada d'inversor per a generar la sortida desitjada. Si la comanda d'error és més gran que la magnitud de l'ona triangular, s'activa l'interruptor de la polaritat positiva de la font d'alimentació (interruptor de dalt). I si l'error és menor s'activa l'interruptor de baix (de polaritat negativa). Això generarà la senyal PWM com es pot observar a la figura . L'inversor està forçat a activar-se amb la freqüència de la senyal triangular i produeix la tensió de sortida proporcional a la comanda d'error.

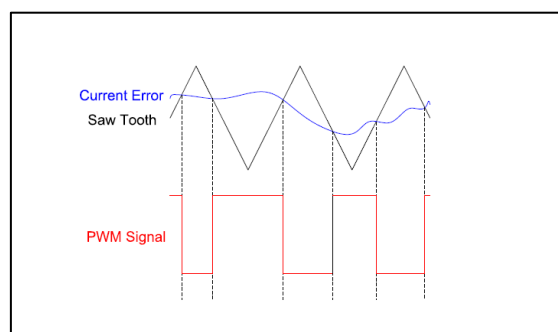


Figura 18. Senyals de corrent

4.4.2 Control de velocitat

La realització de la commutació explicada abans assegura que el propi gir del rotor, en canvi la velocitat amb la que gira el motor només depèn de l'amplitud del voltatge aplicat. Aquesta amplitud s'ajusta utilitzant la tècnica PWM. La velocitat desitjada es

controla amb un controlador de velocitat, que al nostre cas està implementat per un controlador PI. La diferència entre velocitat actual i la velocitat desitjada és l'entrada del control, i analitzant aquesta diferència, el controlador ajusta el cicle de impulsos PWM, per a obtenir l'amplitud de voltatge adequada.

4.4.3 Control de parell

Aquest tipus de control és més habitual en les bicicletes amb assistència elèctrica, ja que la seva funció és repartir l'esforç o parell necessari entre motor i conductor. Per a les aplicacions on la variable a controlar sigui el parell, es pot utilitzar un controlador de corrent ja que parell és directament proporcional a intensitat.

El controlador de corrent està implementat com un control PI convencional. La sortida del control de velocitat és l'entrada del control de corrent, juntament amb el valor de corrent de fase actual. La senyal de sortida d'aquest últim regula el cicle d'impulsos PWM. La combinació de controls de velocitat i de parell està representada a la figura 19.

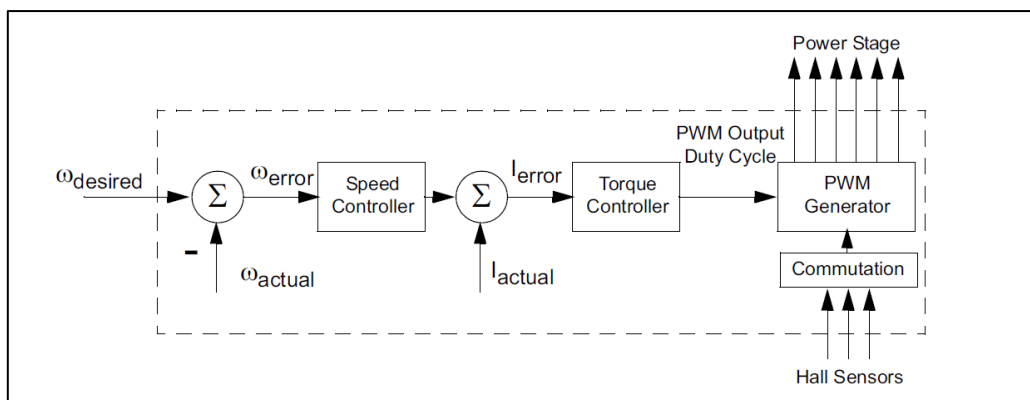


Figura 19. Combinació de control de velocitat i de parell (ELEVICH, 2005)

5 FRENADA REGENERATIVA

5.1 Fonaments teòrics

Com ja s'havia mencionat anteriorment el sistema del que disposem incorpora la funció de recuperació d'energia, que s'anomena la frenada regenerativa.

El fre regeneratiu permet reduir la velocitat d'un vehicle transformant la part de la seva energia cinètica a l'energia elèctrica. Es basa en el principi de que un motor elèctric pot ser utilitzat com un generador.

Els modes de funcionament d'un motor *brushless* es pot representar gràficament com es pot observar a la figura 20.

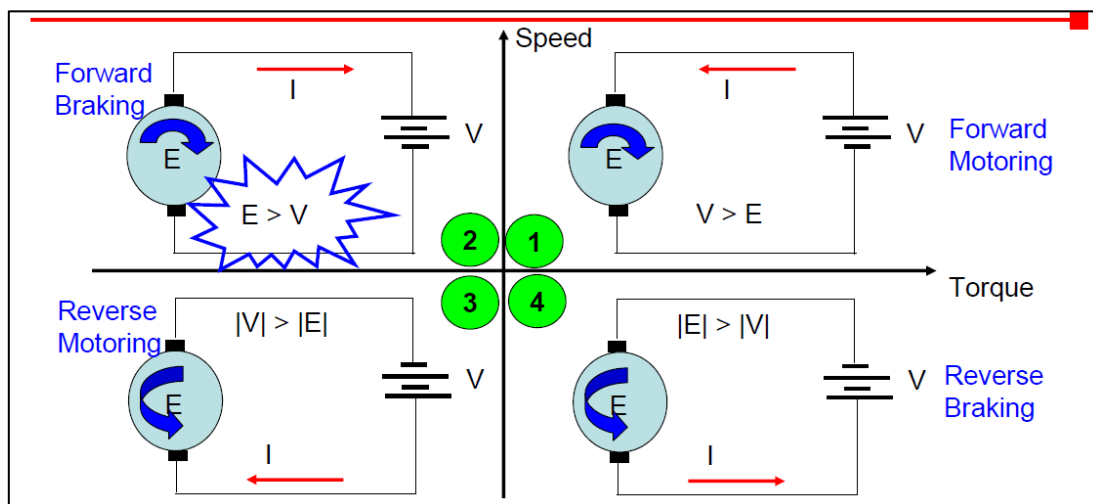


Figura 20. Modes de funcionament del motor (MICROCHIP, 2005)

Com es pot veure el sistema de coordenades està composta pels eixos de parell i velocitat. Ja se sap que parell és directament proporcional a la intensitat de fase i la força contraelectromotriu a la velocitat.

Espai de funcionament està dividit en quatre quadrats:

- Quadrat 1: La màquina funciona com un motor, el voltatge aplicat és més gran que la BEMF. El producte de tensió per intensitat és positiu, o sigui la potència és positiva, la màquina està absorbint l'energia.
- Quadrat 2: La màquina està en el mode de generador. La BEMF és més gran que la tensió aplicada. La intensitat té el signe negatiu i el producte de voltatge

per intensitat dona un valor negatiu, la qual cosa significa que la màquina proporciona l'energia.

- Quadrants 3 i 4: Igual com respectivament als quadrants 1 i 2, però amb el sentit de gir oposat.

Doncs, s'interessa que el motor pugui funcionar en diferents modes, sobretot que el sistema pugui absorbir l'energia generada pel mateix motor.

L'objectiu de frenada regenerativa no és dissipar l'energia en calor com ho realitza la frenada dinàmica mitjançant un fre mecànic o una resistència, sinó aprofitar l'energia cinètica per a recarregar la bateria que alimenta el motor.

Per a que el motor pugui realitzar aquesta recuperació d'energia és necessari que els equips d'electrònica ho permetin i ho gestionin.

5.2 Convertidor estàtic/inversor/convertidor bidireccional

Un dispositiu electrònic bàsic que permet implementar la tasca de circulació de corrent en les dues sentits, quan sigui necessari, és el convertidor o pont bidireccional. Esquema general d'un circuit en diferents modes de funcionament es pot veure a la figura 21.

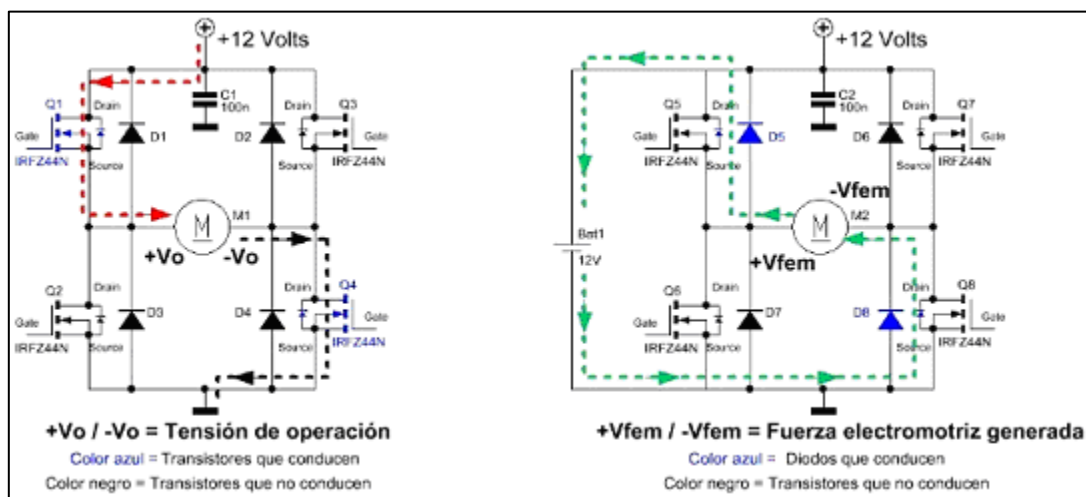


Figura 21. Circuit en diferents modes de funcionament (TRAVÉ, 2009)

A la part d'esquerra es pot observar el mode de motor, on la lletra M representa les dues fases del motor trifàsic composta per resistència, inductància i la font de la força

contra electromotriu. Els transistor marcats de color blau Q1 i Q4 estan activats, i els de color negre no ho són. Amb la fletxa vermella i negra està indicat el sentit de corrent.

A la part dreta d'esquema veiem el funcionament de la màquina en mode generador. Al girar l'eix mecànic d'un motor d'imant permanent es indueix una força contra electromotriu als borns de connexió que depèn dels paràmetres constructius del motor i de la velocitat de gir.

Per a poder passar d'un mode a l'altre, als casos que poden ser per exemple a les baixades llargues quan no és necessari seguir impulsant el vehicle i es busca detenir la marxa, s'aplica la tècnica de frenada regenerativa. De manera general, la forma de frenar un motor elèctric és provocar un curtcircuit o un pont entre extrems de les seves connexions. Però així, l'energia només es dissipa en forma de calor en els transistors. En canvi, la frenada regenerativa, és una forma de utilitzar l'energia generada pel motor (V_{emf}), per a recarregar la bateria, mitjançant utilització de components electrònics adequats. Quan la tensió generada supera el voltatge de bateria (al nostre cas és de 36V) en més de 1.4V, es produeix la circulació de corrent cap a bateria.

5.3 L'inversor trifàsic

Com ja s'havia dit abans el motor *brushless* s'alimenta a través d'un inversor trifàsic. O sigui, és un aparell que constitueix de tres inversors monofàsics combinats en un sol sistema de 6 transistors. Per això, en un inversor trifàsic també es pot realitzar la frenada regenerativa, commutant adequadament els sis interruptors com es pot observar a la figura 22.

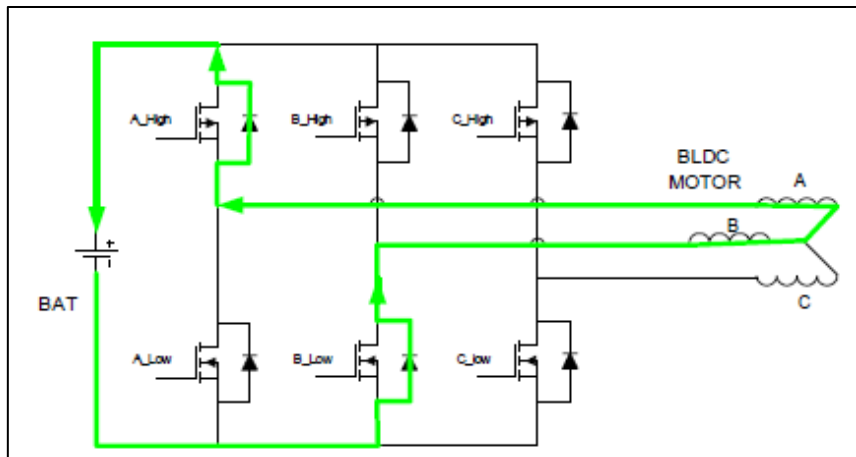


Figura 22. Frenada regenerativa a l'inversor trifàsic (TRAVÉ, 2009)

Per a conèixer l'instant d'aplicació de la frenada s'utilitza un aparell que s'anomena sensor de fre o *e-brake*. És un sensor que s'instal·la a la maneta de fre i es connecta al controlador, tal i com s'observa a la figura 23. A l'hora de frenar ho detecta i envia la senyal al controlador amb el fi de realitzar la commutació adequada.

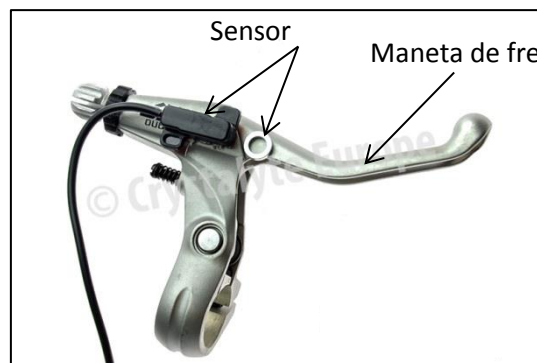


Figura 23. Sensor de fre

6 DESCRIPCIÓ DEL SISTEMA TRIAT

6.1 Aspectes generals

La solució es basa en disseny i elecció d'un sistema d'assistència elèctrica en disseny del sistema d'il·luminació per a un tricicle de càrrega.

Una vegada s'hagi realitzat estudi i anàlisi de sistemes d'assistència elèctrica i dels seus components s'ha decidit adquirir el sistema del fabricant *Crystalyte*. La solució consisteix d'elements següents:

1. Motor *Brushless DC* model HT2425 de la caixa de la roda davantera (diàmetre de la roda 26"), de tipus *direct drive*. La funció de frenada regenerativa inclosa (figura 24).
2. Controlador model MINI36V15A-CTS. Tipus de control *sensorless* (figura 24).
3. Sensor de parell.
4. Bateria Li-ió de 36V. Capacitat 17Ah.
5. Display e-DR mitjançant el qual es fixa 5 nivells d'assistència.
6. Cablejat.



Figura 24. Motor i controlador Crystalyte

L'esquema general del sistema elèctric es pot observar a la figura 25. La part de la solució del sistema d'il·luminació està descrita al capítol número 7.

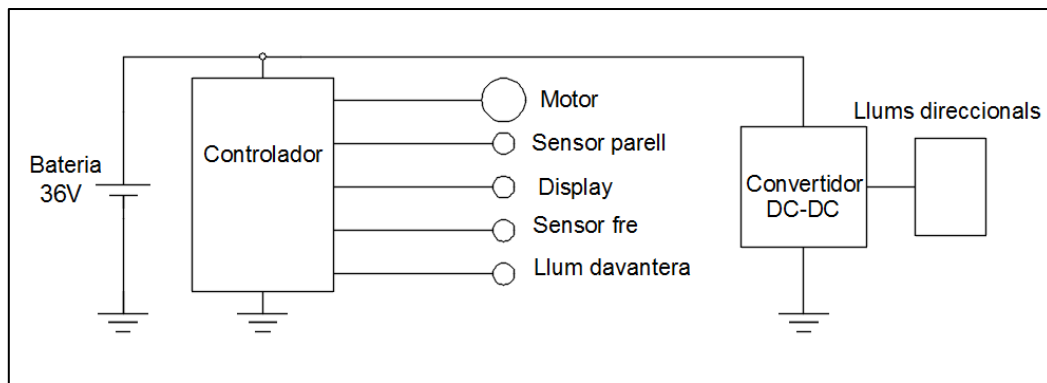


Figura 25. Elements del sistema elèctric del tricicle

El sistema de cablejat consisteix d'elements següents:

1. Cable Bateria-Controlador
2. Cable Controlador-Motor
3. Cable Controlador-Sensor parell
4. Cable Controlador-Display
5. Cable Controlador-Sensor del fre
6. Cable Controlador-Llum davantera

Tots aquets cables necessaris estan proporcionades pel mateix fabricant del sistema. El sistema de cablejat estarà col·locat dins de la funda espiral de polipropilè que estarà subjectada sota del marc del tricicle mitjançant les brides, de manera semblant tal i com s'observa a la figura 26.



Figura 26. Funda espiral on es col·loca el cablejat

6.2 Objectius del sistema

L'objectiu de sistema d'assistència elèctrica instal·lat al tricicle és complir els requeriments establerts pel peticionari, o sigui:

- El motor ha de ser capaç de realitzar l'assistència elèctrica a l'hora de desplaçar-se a qualsevol punt de la ciutat de Girona.
- La bateria ha de tenir prou capacitat per a disposar d'autonomia com a mínim per a una jornada laboral.

Dimensionament i elecció del sistema *Crystalyte* principalment ha estat condicionada per aquests requeriments. Les característiques principals del sistema disposat estan recollides a la taula 1.

Característiques	Valor
Tensió del sistema	36V
Potència nominal motor	250W
Parell nominal motor	8.53Nm
Potència màxima motor	450W
Parell màxim motor	47.74Nm
Capacitat bateria	17Ah

Taula 1. Característiques del sistema Crystalyte

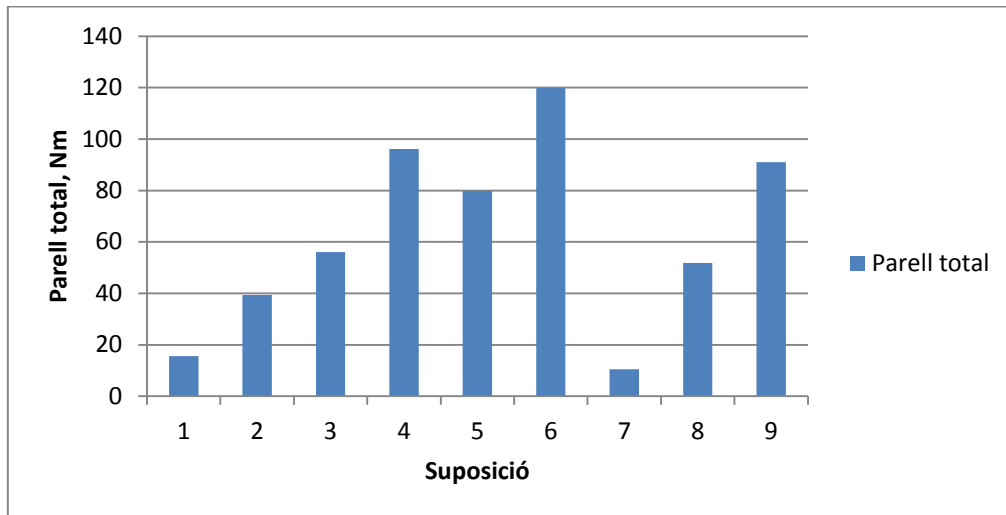
6.3 Requeriments del motor

L'estudi de dimensionament del motor està basat en suposicions que tenen en compte diferents tipus de moviment del vehicle i està descrit detalladament a l'annex de càlcul. Aquestes suposicions són següents:

1. Moviment del tricicle a velocitat constant.
2. Moviment del tricicle amb acceleració constant.
3. Moviment del tricicle a velocitat constant per una pendent de 5%.
4. Moviment del tricicle a velocitat constant per una pendent de 10%.
5. Moviment del tricicle amb acceleració constant per una pendent de 5%.
6. Moviment del tricicle amb acceleració constant per una pendent de 10%.
7. Arrencada del tricicle al terreny pla.

8. Arrencada del tricicle en una pendent de 5%.
9. Arrencada del tricicle en una pendent de 5%.

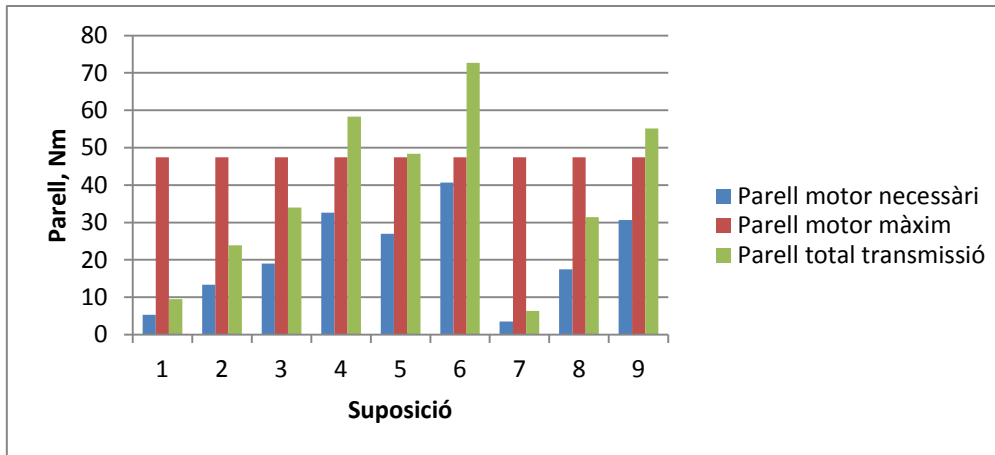
A l'hora de realitzar els càlculs de sol·licitacions de parell s'ha agafat el cas extrem de pes del tricicle que és de 250kg. Els valors de parell total necessari per a cada suposició descrita anteriorment es pot observar a la gràfica 1.



Gràfica 1. Parell total necessari

Com es pot veure al cas d'acceleracions l'esforç que ha de realitzar el sistema motriu té els valors elevats. D'aquesta manera el sistema motriu mitjançant el conductor i sistema de transmissió mecànic d'una part i el motor elèctric d'altra han de disposar (o si no en disposen, definir aquestes limitacions) de potència suficient per a moure el tricicle.

A la gràfica 2 es pot observar el resultat de demanda de parell al motor (nivell màxim d'assistència) per a cada suposició en comparació al parell total, tenint en compte el coeficient de reducció $i=1.65$ de sistema de transmissió.



Gràfica 2. Sol·licitacions de parell per a cada tipus de moviment respecte el parell total

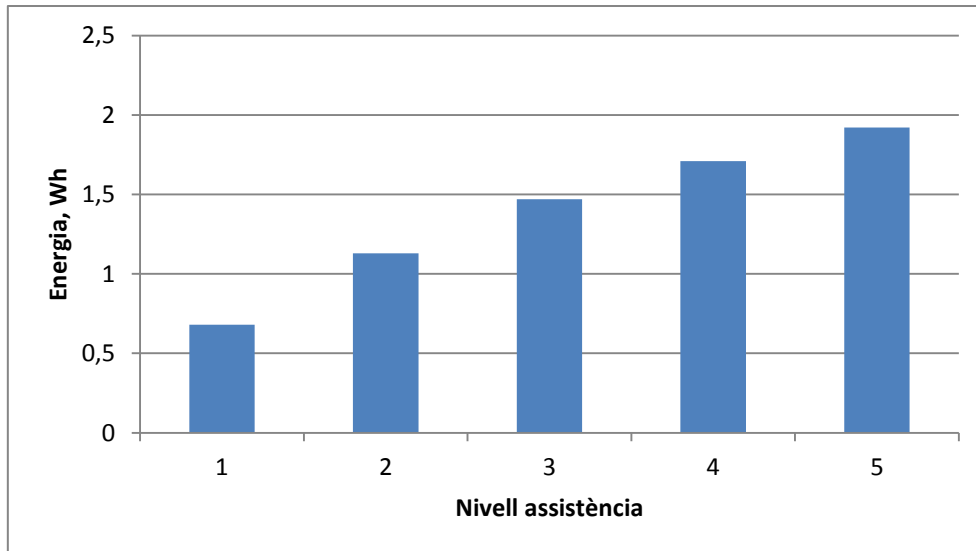
Tal i com s'observa a la gràfica 2, al cas d'assistència màxima el motor exerceix més de la meitat de l'esforç total necessari i no sobrepassa el valor màxim.

6.4 Requeriment d'autonomia

L'estudi d'autonomia està basat en el cicle urbà aproximat ECE-15 que consisteix en la seqüència següent:

1. Acceleració del tricicle de 0 a 15km/h en 5 s $\rightarrow a=0.833\text{m/s}^2$.
2. Velocitat constant, $v=15\text{km/h}$ durant 15s.
3. Acceleració de 0 a 25km/h en 15s $\rightarrow a=0.463\text{m/s}^2$.
4. Velocitat constant, $v=25\text{km/h}$ durant 30s.
5. = 3.
6. Velocitat constant, $v=25\text{km/h}$ durant 15s.
7. De 25 a 15 km/h en 5 s, acceleració negativa (frenada) $\rightarrow a=-0.55\text{m/s}^2$.
8. Velocitat constant, $v=15\text{km/h}$ durant 15s.

L'energia necessària que es demana al motor per a realitzar el cicle per a cada nivell d'assistència es pot observar a la gràfica 3.



Gràfica 3. Energia del motor

I com a resultat l'autonomia del sistema al cas de màxim nivell d'assistència és de 129km. Cal destacar que el cicle no té en compte els factors molt importants com per exemple les pujades, l'estil de conducció (acceleracions o frenades brusques), dies ventosos, etc., per això es pot dir que és el resultat molt aproximat.

7 SISTEMA D'IL·LUMINACIÓ

7.1 Introducció

Sistema d'il·luminació del tricicle principalment consisteix de dos tipus de llums: llums de posició i llums direccionals intermitents. La figura 27 representa l'esquema del sistema d'il·luminació amb tots els seus components.

La normativa que fa referència als tricicles diu que cada vehicle ha de disposar de llums de posició davantera i de darrere. Doncs, el nostre sistema amb objectiu de complir la normativa consistirà d'una llum davantera i dues llums de darrere. Al seu lloc les llums intermitents direccionals no són obligatoris.

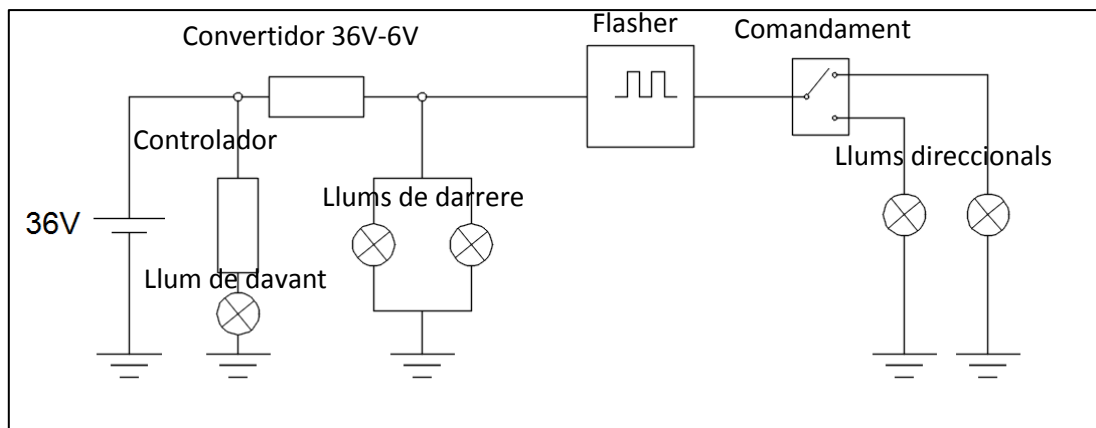


Figura 27. L'esquema elèctric del sistema d'il·luminació

7.2 Llum de davant

L'objectiu de disposar d'aquesta llum és donar la senyal de presència del vehicle als altres participants del tràfic o als vianants. Com indica el seu nom és la llum principalment de posició, o sigui no té perquè utilitzar-se per a il·luminar el camí davant seu.

La solució realitzada ha sigut el faró de tres bombetes LED del fabricant *Spanninga*, de la potència 5W i de nivell d'il·luminació 30 Lux, que es pot observar a la figura 28. Sent la llum LED, obtenim la solució perfecta a l'hora de buscar les característiques com el baix consum energètic, eficiència i qualitat. L'altre aspecte important ha sigut el tipus de connexió que porta, que és idèntic al que té el controlador del kit. La construcció de

la llum permet el funcionament a l'interval de voltatge d'entrada de 6 a 50 Volts, on el controlador ens proporciona la sortida de 36V. D'aquesta manera no ha sigut necessari fer cap tipus d'empalmament extra i s'ha pogut fer servir aquesta sortida, proporcionada pel controlador, per a connectar el faró.



Figura 28. Llum de davant i el connector

7.3 Llums de darrere

Al cas de llums de darrere l'objectiu és el mateix, o sigui senyalar la posició del vehicle a altres. El mateix fabricant *Spanninga* proporciona un parell de models de llums LED que puguin ser alimentats per la font d'alimentació externa (sigui la bateria o dinamo) i no de les piles, com la gran majoria que hi ha al mercat, com es pot veure a la figura 28. Cada llum és de potència de 3W i de nivell d'il·luminació de 10 Lux.



Figura 29. Llums de darrere

El connector que porta aquesta llum és del tipus que s'utilitza per alimentació de dinamos, ja que principalment està dissenyada per ser utilitzada en una bicicleta, i s'observa a la figura 30.



Figura 30. Connector llums de darrere

Com es pot observar a l'esquema de connexions, les llums de darrere estan connectades al convertidor de voltatge que al seu lloc es connecta directament a la bateria en paral·lel amb el controlador. El convertidor de voltatge és un aparell que fa la funció de reductor de la tensió i proporciona la sortida de 6V, i es pot veure a la figura 31.



Figura 31. Convertidor e voltatge

La necessitat d'instal·lar aquest component venia des de incorporació al projecte d'instal·lació de les llums direccionals, lo que serà explicat més endavant.

7.4 Llums intermitents direccionals (de darrere)

Com ja s'havia comentat abans la normativa no demana la presència de llums direccionals, d'aquesta manera l'objectiu d'aquest tipus de llums és sobretot poder senyalar amb facilitat i comoditat els canvis de direcció de moviment als altres participants del tràfic. Les dimensions del vehicle, que arriba a tenir l'amplada més d'un metre fa que les senyals de canvi de direcció amb les mans, que és típic al cas de ciclistes, no es puguin veure bé, pels vehicles que van darrere.

Cal destacar que el sistema de llums direccionals intermitents gairebé no està present al mercat de bicicletes o tricicles elèctriques. Per això la solució s'havia de buscar al món de motos. La condició més important que comporta la instal·lació del sistema d'intermitents de la moto és disposar de la tensió amb la que treballa el sistema, que més habitual és de 12 o de 6 Volts. Com ja sabem, la bateria de la que disposem proporciona el voltatge de sortida de 36V, doncs per aquesta raó s'ha adquirit un convertidor que pot donar la tensió de 6V.

El sistema de llums direccionals consisteix d'elements següents: el flasher, el comandament o interruptor i les llums.

7.4.1 El flasher

El flasher o el relé d'intermitència és un dispositiu electromagnètic responsable de realitzar la funció d'intermitència. Dins seu porta una bobina amb un nucli desplaçable que per efecte de pas de corrent es magnetitza i atrau el contacte, que al seu lloc alimenta les llums. Un cop el contacte es tanqui i la bombeta s'encén, el corrent deixa de passar per la bobina i el contacte es torna a obrir.

A la figura 32 es pot observar un flasher de la moto de 6V. Com es veu n'hi ha tres connectors, dos es connecten a la font d'alimentació i l'altre es connecta al interruptor o comandament. Cal destacar que els relés d'intermitència de 6V actualment no s'utilitzen gaire, ja que la majoria de motocicletes treballen amb voltatge de 12V.

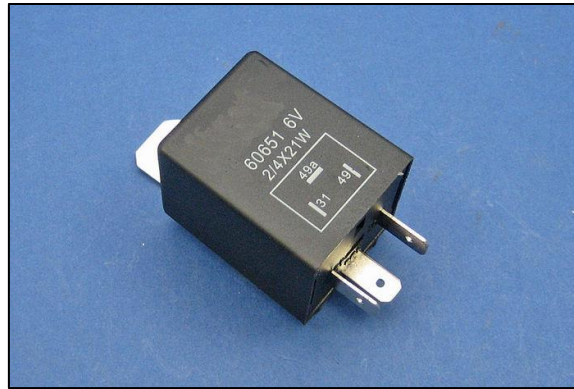


Figura 32. Flasher

7.4.2 El comandament

La funció principal del aparell de comandament és activar i apagar les llums direccionals, sigui fa la mateixa funció de la palanca d'intermitents del cotxe. Ha d'estar connectat al flasher i també a les llums.

Com s'havia mencionat abans, la majoria dels components del sistema d'intermitents estan dissenyades per la moto. A la figura 33 es pot observar un típic interruptor de llums intermitents per una moto petita.



Figura 33. Comandament de llums direccionals

Com es pot veure l'aparell més a més fa funció d'interruptor de clàxon i de la llum davantera. Al nostre cas no tindrem aquets elements ni farem servir aquets botons, per això els cables corresponents han de ser aïllats amb seguretat.

7.4.3 Les llums

Principalment les llums direccionals són del mateix tipus que llums de posició amb diferència de que estan connectades mitjançant el flasher per a poder ser intermitents. Per això la solució podria ser la llum LED del fabricant *Spanninga*, que es pot veure a la figura 34.



Figura 34. Llums direccionals

8 CONCLUSIONS

El disseny del sistema d'assistència elèctrica compleix totes les especificacions acordades amb el client igual com la Norma UNE-EN 15194:2009+A1. És un sistema motriu prou potent per a poder realitzar la funció de repartiment de mercaderies o paqueteria a qualsevol punt de la ciutat de Girona i proporciona l'autonomia suficient per a una jornada laboral.

El sistema d'il·luminació disposa de llums fixes de posició de davant i de darrere, i també de llums direccionals intermitents de darrere.

9 RESUM DEL PRESSUPOST

Capítol	Import(€)
Components sistema elèctric	1.232,10
Muntatge	50,00
TOTAL	1.282,10

En el pressupost s'ha estimat un valor de 1.282,10€ (mil dos cents vuitanta-dos euros amb deu cèntims).

10 RELACIÓ DE DOCUMENTS

Document 1: Memòria i annexos

Document 2: Plec de condicions

Document 3: Estat d'amidaments

Document 4: Pressupost

11 BIBLIOGRAFIA

1. AKIN, B., BHARDWAJ, M. Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors. Texas Instruments – Application Report, 2013.
2. BALDURSSON, S. BLDC Motor Modeling and Control – A Matlab/Simulink Implementation. Institutionen för Energi och Miljö, 2005
3. BUCHI, R. Brushless Motors and Controllers. BoD – Books on Demand, 2012.
4. ELEVICH, L. 3-phase BLDC Motor Control with Hall Sensors Using 56800/E Digital Signal Controllers. Freescale Semiconductor – Application Note. 2005.
5. KARUNAKARAN, N. Implementation of DSP Based Sensorless Control with Direct Back-EMF Detection Method for BLDC Motor, 2008.
6. MORCHIN, W. Electric Bicycles: A Guide to Design and Use. Electric Bicycle Manual, 2006.
7. TRINIDAD LÓPEZ, F. El vehículo eléctrico. Tecnología, desarrollo y perspectivas de futuro. McGraw-Hill, 1997.

12 GLOSSARI

- **BEMF:** *Back Electro-motive Force*, Força contraelectromotriu.
- **BLDC:** *Brushless DC*, Motor sense escombretes de corrent continua.
- **Hub:** Es fa referència al motor tipus de la caixa de la roda.
- **PWM:** *Pulse-width modulation*, Modulació per amplada de polsos. És una tècnica on es modifica el cicle de treball d'una senyal periòdica.
- **Sensorless:** Es fa referència al tipus de control sense sensors.

ANNEX A. CÀLCULS

A.1 CÀLCUL DE PERCENTATGE D'ASSISTÈNCIA ELÈCTRICA

Objectiu:

Calcular el percentatge d'esforç que realitza el motor elèctric a l'hora de moure el tricicle en diferents casos.

Procediment:

El sistema de tracció del tricicle consisteix del conductor i del motor elèctric instal·lat a la caixa de la roda davantera. El sistema d'assistència elèctrica fa la funció de l'ajut per al conductor, repartint el parell total necessari per a moure el vehicle:

$$T_t = T_m + T_c$$

On: T_m – el parell fet pel motor en Nm, T_c – el parell fet pel conductor en Nm

Ja que disposem d'un sensor de parell, el control del sistema determina la quantitat de parell que exerceix una persona, per a donar la comanda a motor per a que comenci a actuar. El sistema del que se disposa té 5 nivells d'assistència: 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, o sigui el percentatge de l'esforç que fa el conductor, de manera que el parell que ha donar el motor serà:

$$T_m = k * T_c$$

On: k – el percentatge d'assistència

Doncs, el parell total queda:

$$T_t = T_c * (k + 1)$$

I, finalment el parell de motor:

$$T_m = k * \frac{T_t}{k + 1}$$

D'aquesta manera el parell que s'exerceix pel motor elèctric serà:

k(%)	Tm(%Tt)
25	0,2
50	0,33
75	0,43
100	0,50
125	0,56

Taula 2. Assistència del motor

A l'hora de calcular els esforços que es realitzem pel motor, s'ha de tenir en compte la relació de transmissió del tricicle. La transmissió està composta pels elements: plat-canvi-diferencial, tal i com s'observa a la figura 35.

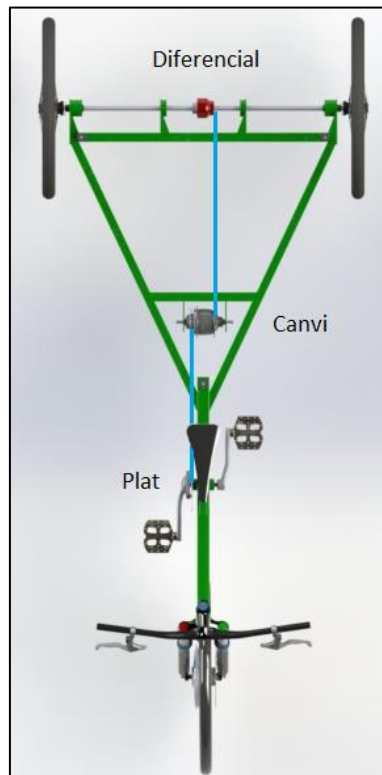


Figura 35. Sistema transmissió tricicle

Aquesta part de càlcul està realitzada pel Sr. Jordi Ponsí, el projectista de la part mecànica del tricicle i el resultat que s'ha obtingut està presentat a la taula 3.

Marxa	Relació
1	1,65
2	1,95
3	2,13
4	2,34
5	2,57
6	2,85
7	3,15
8	3,9

Taula 3. Relació de transmissió

A.2 TRICICLE A VELOCITAT CONSTANT

Objecte:

Calcular el parell total necessari i parell que ha de realitzar el motor per a moure el tricicle amb la velocitat constant.

Dades:

M: Massa tricicle a plena càrrega	250kg
R: Radi de la roda davantera	0.33m
S: Àrea frontal del tricicle	1.5m ²
Cx: Resistència de l'aire	0.33
J: Inèrcia de masses rodats	1 kg*m ²
fr: Coeficient de fricció	0.013
Parell màxim de motor	47.74Nm

Procediment:

Al cas de mantenir el moviment del tricicle a una velocitat constant el parell que s'ha de vèncer consisteix de la suma de parell de fricció i de parell aerodinàmic.

Parell de fricció, degut a les forces de fricció (F_f) serà:

$$F_f = N * fr = M * g * \cos \beta * fr$$

On: β – l'angle d'inclinació del terreny en graus

Finalment, el parell de fricció serà:

$$T_f = F_f * R = (M * g * \cos \beta * f_r) * R$$

Parell aerodinàmic, degut a les forces de resistència d'aire (F_{aer}):

$$F_{aer} = \frac{1}{2} * \rho * C_x * S * v^2$$

On: ρ – densitat d'aire, $\rho=1.293\text{kg/m}^3$, v – velocitat de vehicle, considerem el cas extrem $v_{\max}=25\text{km/h}=6.94\text{m/s}$

Finalment s'obté el parell aerodinàmic:

$$T_{aer} = \left(\frac{1}{2} * \rho * C_x * S * v^2\right) * R$$

Cal mencionar que les forces aerodinàmiques són importants quan el vehicle assoleix unes velocitat relativament elevades, però ja que la velocitat màxima permesa pel nostre tricicle és de 25km/h, el parell aerodinàmic serà considerable només als dies ventosos.

Doncs, el parell total de velocitat constant serà:

$$T_v = \left(\frac{1}{2} * \rho * C_x * v^2 + M * g * \cos \beta * f_r\right) * R$$

El parell total necessari per a realitzar el moviment a velocitat constant per diferents valors de velocitat, es pot observar a la taula 4.

V(m/s)	V(km/h)	fr	M(kg)	Ff(N)	Tf(Nm)	Taer(Nm)	Tt(Nm)
0	0	0,013	250	0	0	0	0
1,39	5	0,013	250	31,883	10,52	0,20	10,73
2,78	10	0,013	250	31,883	10,52	0,82	11,34
4,17	15	0,013	250	31,883	10,52	1,84	12,36
5,56	20	0,013	250	31,883	10,52	3,28	13,80
6,94	25	0,013	250	31,883	10,52	5,12	15,64

Taula 4. Parell total a velocitat constant

Aplicant el coeficient de transmissió més petit ($i=1.65$), el parell que s'ha de donar el motor serà, tal i com s'observa a la taula 5.

Tv(Nm)	Transmissió(Nm)	Tm25%(Nm)	Tm50%(Nm)	Tm75%(Nm)	Tm100%(Nm)	Tm125%(Nm)
0	0	0	0	0	0	0
10,71	6,49	1,30	2,14	2,79	3,25	3,64
11,33	6,87	1,37	2,27	2,95	3,43	3,84
12,35	7,49	1,50	2,47	3,22	3,74	4,19
13,79	8,35	1,67	2,76	3,59	4,18	4,68
15,63	9,47	1,89	3,13	4,07	4,74	5,30

Taula 5. Parell de motor a velocitat constant

Com es pot observar els valors són acceptables pel correcte funcionament del sistema.

A.3 TRICICLE A ACCELERACIÓ CONSTANT

Objecte:

Calcular el parell total necessari i parell que ha de realitzar el motor per a moure el tricicle amb l'acceleració.

Dades:

Les mateixes característiques del annex A.2

Procediment:

En aquest cas es necessita un parell que permeti, per un costat, l'avanç de vehicle, i per altre, accelerar de la forma desitjada tota la massa del tricicle. El parell d'acceleració consisteix en vèncer la inèrcia de gir i disposar d'un parell per a accelerar la massa.

Parell inercial dels elements de gir (motor, rodes):

$$T_i = J * \alpha = J * \frac{a}{R}$$

On: α – acceleració angular de la roda, $\alpha=a/R$, a – acceleració lineal de la roda, que coincideix amb l'acceleració lineal del tricicle en m/s^2

Parell d'acceleració de la massa es pot calcular de la següent manera:

$$T_{mv} = (M * a) * R$$

Finalment, el parell d'acceleració serà:

$$T_a = T_i + T_{mv} = \left(\frac{J}{R} + M * R\right) * a$$

El parell total necessari per a accelerar el tricicle s'obté sumant el parell de moviment constant (trobat abans) amb el parell d'acceleració. El resultat es presenta en funció de diferents valors d'acceleració (s'ha suposat el temps necessari per a arribar fins a la velocitat de 25km/h) i està recollit a la taula 6.

V(m/s)	Temps(s)	a(m/s ²)	T _i (Nm)	T _a (Nm)	T _{accel} (Nm)	T _v (Nm)	T _t (Nm)
6,94	5	1,39	4,21	114,58	118,79	15,64	134,43
6,94	10	0,69	2,10	57,29	59,40	15,64	75,04
6,94	15	0,46	1,40	38,19	39,60	15,64	55,24
6,94	20	0,35	1,05	28,65	29,70	15,64	45,34
6,94	25	0,28	0,84	22,92	23,76	15,64	39,40

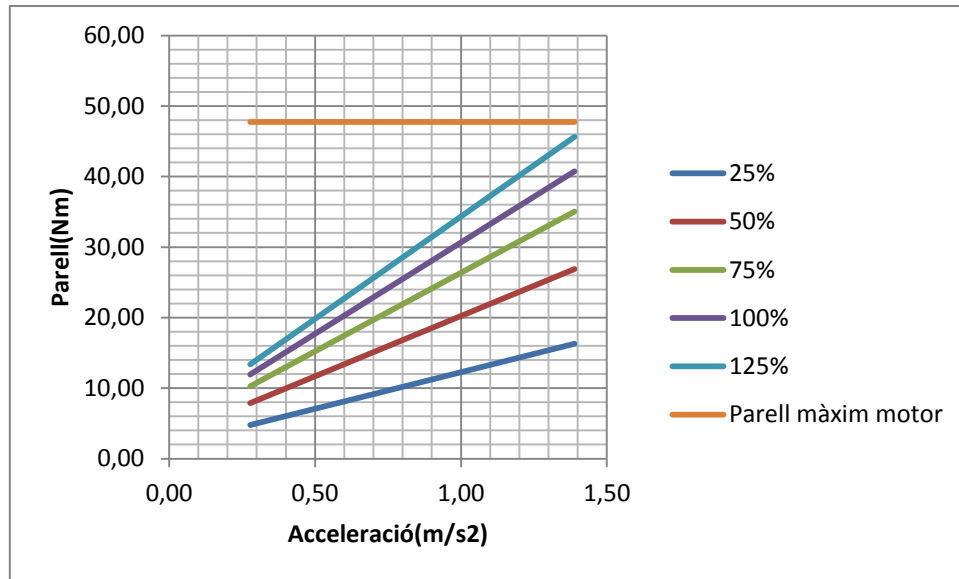
Taula 6. Parell total a acceleració constant

Aplicant el coeficient de transmissió més petit (i=1.65), s'obté (taula 7):

T _t (Nm)	Transmissió(Nm)	T _m 25%(Nm)	T _m 50%(Nm)	T _m 75%(Nm)	T _m 100%(Nm)	T _m 125%(Nm)
134,43	81,47	16,29	26,89	35,03	40,74	45,63
75,04	45,48	9,10	15,01	19,55	22,74	25,47
55,24	33,48	6,70	11,05	14,40	16,74	18,75
45,34	27,48	5,50	9,07	11,82	13,74	15,39
39,40	23,88	4,78	7,88	10,27	11,94	13,37

Taula 7. Parell de motor a acceleració constant

Ja es veu que al cas d'acceleracions ràpides, el parell que ha de donar el motor és força gran i s'apropa al valor màxim que pot proporcionar el motor. El resultat es pot observar en la gràfica 4.



Gràfica 4. Parell de motor

A.4 TRICICLE A VELOCITAT CONSTANT PUJANT PER UNA PENDENT

Objecte:

Calcular el parell total necessari i parell que ha de realitzar el motor per a moure el tricicle amb la velocitat constant per una pendent.

Dades:

Les mateixes característiques del annex A.2

Procediment:

En aquest cas el parell total consisteix de l'esforç necessari per a moure el tricicle a velocitat constant i del parell de superació d'una pendent. Quan el vehicle es troba sobre una pendent, el fet de que la força del pes no sigui perpendicular al terreny, fa que aparegui una component d'aquesta força en la mateixa direcció de l'avanç (F_p):

$$F_p = M * g * \sin\beta$$

Aquesta component addicional actua de forma diferent segons el tricicle estigui baixant o pujant. El parell degut a aquesta força serà:

$$Tp = M * g * \sin\beta * R$$

Finalment, el parell de velocitat constants sobre una pendent s'obté de manera:

$$Tt = Tv + Tp$$

Suposem els casos de superació de les inclinacions de 5 i 10%:

- $i=5\%$ on $\beta = \text{artg}(0.05) = 2.86^\circ$

Els resultats de parell total són a la taula 8.

V(m/s)	V(km/h)	fr	Ff(N)	Tf(Nm)	Taer(Nm)	Tv(Nm)	Tp(Nm)	Tt(Nm)
0	0	0,013	0	0	0	0	40,38	40,38
1,39	5	0,013	31,84	10,51	0,20	10,71	40,38	51,09
2,78	10	0,013	31,84	10,51	0,82	11,33	40,38	51,71
4,17	15	0,013	31,84	10,51	1,84	12,35	40,38	52,73
5,56	20	0,013	31,84	10,51	3,28	13,79	40,38	54,17
6,94	25	0,013	31,84	10,51	5,12	15,63	40,38	56,01

Taula 8. Parell total a velocitat constant en una pendent de 5%

Aplicant el coeficient de transmissió més petit ($i=1.65$), els valors e parell proporcionat pel motor, per diferents nivells d'assistència serà (taula 9):

Tt(Nm)	Transissió(Nm)	Tm25%(Nm)	Tm50%(Nm)	Tm75%(Nm)	Tm100%(Nm)	Tm125%(Nm)
40,38	24,47	4,89	8,08	10,52	12,24	13,71
51,09	30,97	6,19	10,22	13,32	15,48	17,34
51,71	31,34	6,27	10,34	13,48	15,67	17,55
52,73	31,96	6,39	10,55	13,74	15,98	17,90
54,17	32,83	6,57	10,83	14,12	16,41	18,38
56,01	33,95	6,79	11,20	14,60	16,97	19,01

Taula 9. Parell de motor a velocitat constant en una pendent de 5%

- $i=10\%$ on $\beta = \text{artg}(0.1) = 5.71^\circ$

El parell total, per diferents valors de velocitat serà (taula 10):

V(m/s)	V(km/h)	fr	Ff(N)	Tf(Nm)	Taer(Nm)	Tv(Nm)	Tp(Nm)	Tt(Nm)
0	0	0,013	0	0	0	0	80,52	80,52
1,39	5	0,013	31,84	10,51	0,20	10,71	80,52	91,24
2,78	10	0,013	31,84	10,51	0,82	11,33	80,52	91,85
4,17	15	0,013	31,84	10,51	1,84	12,35	80,52	92,87
5,56	20	0,013	31,84	10,51	3,28	13,79	80,52	94,31
6,94	25	0,013	31,84	10,51	5,12	15,63	80,52	96,15

Taula 10. Parell total a velocitat constant en una pendent de 10%

Aplicant el coeficient de transmissió més petit ($i=1.65$), els valors e parell proporcionat pel motor, per diferents nivells d'assistència seran (taula 11):

Tt(Nm)	Transissió(Nm)	Tm25%(Nm)	Tm50%(Nm)	Tm75%(Nm)	Tm100%(Nm)	Tm125%(Nm)
80,52	48,80	9,76	16,10	20,98	24,40	27,33
91,24	55,29	11,06	18,25	23,78	27,65	30,96
91,85	55,67	11,13	18,37	23,94	27,83	31,17
92,87	56,29	11,26	18,57	24,20	28,14	31,52
94,31	57,16	11,43	18,86	24,58	28,58	32,01
96,15	58,27	11,65	19,23	25,06	29,14	32,63

Taula 11. Parell de motor a velocitat constant en una pendent de 10%

Tal i com s'observa en les taules, el valor màxim permès pel sistema no s'aconsegueix.

A.5 ACCELERACIÓ DEL TRICICLE EN UNA PENDENT

Objecte:

Calcular el parell total necessari i parell que ha de realitzar el motor per a moure el tricicle amb l'acceleració constant per una pendent.

Dades:

Les mateixes característiques del annex A.2

Procediment:

El parell total d'acceleració en un terreny inclinat s'obté sumant els parells de moviment constant, de superació d'una pendent i d'acceleració. La suposició serà trobar l'esforç necessari per a arribar a una velocitat de 25km/h en 25s, o sigui l'acceleració serà:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{6.94m/s}{25s} = 0.278m/s^2$$

El parell total es calcula de la següent manera:

$$Tt = Tv + Ta + Tp$$

Els valors de parells corresponents s'agafen dels càlculs anteriors.

Com abans se suposa les inclinacions de 5 i 10%:

- $i=5\% \rightarrow \beta=2.86^\circ$

$$Tt = 15.63 + 40.38 + 23.76 = 79.77Nm$$

Doncs, el valor que ha de proporcionar el motor per a cada nivell d'assistència es pot observar en la taula 12.

Tt (Nm)	79.77
Transmissió (Nm): $i=1.65$	48.35
Assistència 25% (Nm)	9.67
Assistència 50% (Nm)	15.96
Assistència 75% (Nm)	20.79
Assistència 100% (Nm)	24.18
Assistència 125% (Nm)	27.01

Taula 12. Parell de motor accelerant per una pendent de 5%

- $i=10\% \rightarrow \beta=5.71^\circ$

$$Tt = 15.63 + 80.52 + 23.76 = 119.91Nm$$

Finalment, el parell de motor surt (taula 13):

Tt (Nm)	119.91
Transmissió (Nm): $i=1.65$	72.63
Assistència 25% (Nm)	14.53
Assistència 50% (Nm)	23.97
Assistència 75% (Nm)	31.23
Assistència 100% (Nm)	36.32
Assistència 125% (Nm)	40.67

Taula 13. Parell de motor accelerant per una pendent de 10%

Com es pot veure al cas de assistència màxima (125%) els valors de parell s'apropen al valor límit.

A.6 ARRENCADA DEL TRICICLE EN UN TERRENY PLA

Objecte:

Calcular el parell total necessari i parell que ha de realitzar el motor per a arrencar el tricicle en un terreny pla.

Dades:

Les mateixes característiques del annex A.2.

Procediment:

A l'hora d'arrencar l'únic esforç que s'ha de vèncer és el parell de fricció:

$$T_t = T_f = M * g * f_r * R$$

El terme de $\cos\beta$, no apareix ja que $\beta=0$

Doncs, simplement el parell d'arrencada al pla serà:

$$T_f = 10.51 Nm$$

S'obté el parell de motor per a cada nivell d'assistència, tal i com s'observa a la taula 14.

Tt (Nm)	10.51
Transmissió (Nm): $i=1.65$	6.37
Assistència 25% (Nm)	1.27
Assistència 50% (Nm)	2.12
Assistència 75% (Nm)	2.73
Assistència 100% (Nm)	3.18
Assistència 125% (Nm)	3.54

Taula 14. Parell de motor al arrencar en terreny pla

Com es pot veure els valors de parell són acceptables.

A.7 ARRENCADA DEL TRICICLE EN UNA PENDENT

Objecte:

Calcular el parell total necessari i parell que ha de realitzar el motor per a arrencar el tricicle en una pendent.

Dades:

Les mateixes característiques del annex A.2

Procediment:

El mateix cas que l'anterior, però s'ha de tenir en compte les modificacions degudes a la pendent:

$$T_t = T_p + T_f = (f_r * \cos\beta + \sin\beta) * M * g * R$$

Se suposa les inclinacions de 5 i 10%:

- $i=5\% \rightarrow \beta=2.86^\circ$

$$T_t = 40.38 + 10.51 = 51.89Nm$$

Finalment s'obté el parell de motor (taula 15):

Tt (Nm)	51.89
Transmissió (Nm): $i=1.65$	31.45
Assistència 25% (Nm)	6.29
Assistència 50% (Nm)	10.48
Assistència 75% (Nm)	13.48
Assistència 100% (Nm)	15.72
Assistència 125% (Nm)	17.47

Taula 15. Parell de motor al arrencar en una pendent de 5%

- $i=10\% \rightarrow \beta=5.71^\circ$

$$T_t = 80.52 + 10.47 = 91Nm$$

Finalment, s'obté el parell de motor (taula 16):

Tt (Nm)	91
Transmissió (Nm): $i=1.65$	51.15
Assistència 25% (Nm)	11.03
Assistència 50% (Nm)	18.38
Assistència 75% (Nm)	23.64
Assistència 100% (Nm)	27.58
Assistència 125% (Nm)	30.64

Taula 16. Parell de motor al arrencar en una pendent de 10%

Com es pot veure els valors de parell proporcionat pel motor són acceptables.

A.8 ESTIMMACIÓ DE CONSUM I D'AUTONOMIA DE LA BATERIA

Objectiu:

Estimar el consum energètic i l'autonomia de la bateria.

Dades:

Les mateixes característiques del annex A.2

Procediment:

El mètode de càlcul es basa en un cicle típic de circulació de conducció urbana: el europeu ECE-15.

Segons el cicle ECE-15, la circulació consisteix en etapes següents:

9. Acceleració del tricicle de 0 a 15km/h en 5 s $\rightarrow a=0.833m/s^2$
10. Velocitat constant, $v=15km/h$ durant 15s
11. Acceleració de 0 a 25km/h en 15s $\rightarrow a=0.463m/s^2$.
12. Velocitat constant, $v=25km/h$ durant 30s
13. = 3.
14. Velocitat constant, $v=25km/h$ durant 15s
15. De 25 a 15 km/h en 5 s, acceleració negativa (frenada) $\rightarrow a=-0.55m/s^2$
16. Velocitat constant, $v=15km/h$ durant 15s

La representació gràfica de la seqüència descrita anteriorment (figura 35):

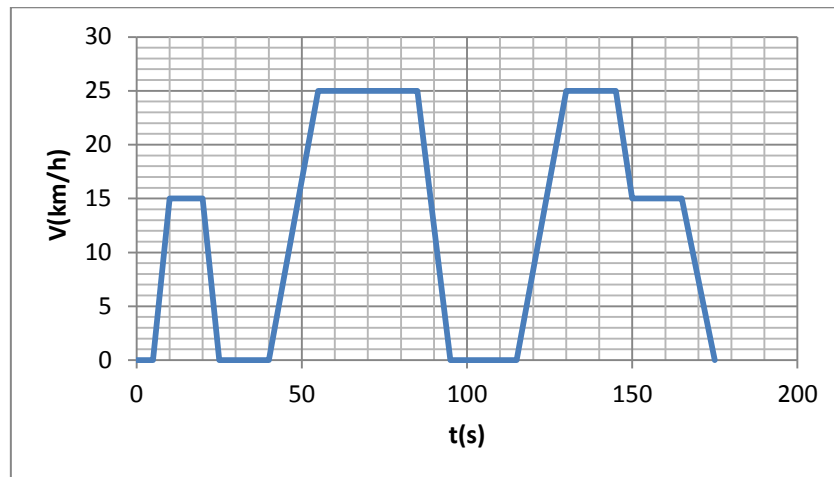


Figura 36. Cicle urbà aproximat

Un cop definit el cicle, es pot calcular l'energia necessària per a moure el tricicle en cada tram i finalment l'energia total del cicle complet.

Energia dels trams on hi h acceleració es calcula de manera:

$$Ea = \frac{1}{2} * t * Pa$$

On: t – temps que dura l'acceleració en segons, Pa – potència exigida al motor en W

L'energia necessària als trams de velocitat constant serà:

$$Ev = Pv * t$$

On: Pv – potència exigida al motor en W

La potència proporcionada pel motor es pot calcular de manera següent

$$Pm = Tm * \omega$$

On: ω – velocitat angular del motor en rad/s

Finalment, l'energia requerida al motor per a cada nivell d'assistència durant recorregut d'un cicle urbà serà, tal i com s'observa a la taula 17.

Seqüència	a(m/s ²)	v(km/h)	Tt(Nm)	Ttransmissió(Nm)	Tm	P(W)	E(Wh)
1	0,833		71,25	43,18	8,64	109,07	0,08
2		15	9,94	6,02	1,20	15,21	0,06
3	0,42		35,92	21,77	4,35	54,99	0,11
4		25	13,21	8,01	1,60	20,23	0,17
5	0,42		35,92	21,77	4,35	54,99	0,11
6		25	13,21	8,01	1,60	20,23	0,08
7					0,00		
8		15	9,94	6,02	1,20	15,21	0,06
							0,68

Seqüència	a(m/s ²)	v(km/h)	Tt(Nm)	Ttransmissió(Nm)	Tm	P(W)	E(Wh)
1	0,833		71,25	43,18	14,25	179,97	0,12
2		15	9,94	6,02	1,99	25,10	0,10
3	0,42		35,92	21,77	7,18	90,74	0,19
4		25	13,21	8,01	2,64	33,38	0,28
5	0,42		35,92	21,77	7,18	90,74	0,19
6		25	13,21	8,01	2,64	33,38	0,14
7					0,00		
8		15	9,94	6,02	1,99	25,10	0,10
							1,13

Seqüència	a(m/s ²)	v(km/h)	Tt(Nm)	Ttransmissió(Nm)	Tm	P(W)	E(Wh)
1	0,833		71,25	43,18	18,57	234,51	0,16
2		15	9,94	6,02	2,59	32,71	0,14
3	0,42		35,92	21,77	9,36	118,24	0,25
4		25	13,21	8,01	3,44	43,49	0,36
5	0,42		35,92	21,77	9,36	118,24	0,25
6		25	13,21	8,01	3,44	43,49	0,18
7					0,00		
8		15	9,94	6,02	2,59	32,71	0,14
							1,47

Seqüència	a(m/s ²)	v(km/h)	Tt(Nm)	Ttransmissió(Nm)	Tm	P(W)	E(Wh)
1	0,833		71,25	43,18	21,59	272,68	0,19
2		15	9,94	6,02	3,01	38,03	0,16
3	0,42		35,92	21,77	10,89	137,49	0,29
4		25	13,21	8,01	4,00	50,57	0,42
5	0,42		35,92	21,77	10,89	137,49	0,29
6		25	13,21	8,01	4,00	50,57	0,21
7					0,00		
8		15	9,94	6,02	3,01	38,03	0,16
							1,71

Seqüència	a(m/s ²)	v(km/h)	Tt(Nm)	Ttransmissió(Nm)	Tm	P(W)	E(Wh)
1	0,833		71,25	43,18	24,18	305,40	0,21
2		15	9,94	6,02	3,37	42,59	0,18
3	0,42		35,92	21,77	12,19	153,98	0,32
4		25	13,21	8,01	4,48	56,64	0,47
5	0,42		35,92	21,77	12,19	153,98	0,32
6		25	13,21	8,01	4,48	56,64	0,24
7					0,00		
8		15	9,94	6,02	3,37	42,59	0,18
							1,92

Taula 17. Energia requerida per a cada nivell d'assistència

Com es pot veure, al ficar el nivell d'assistència més gran, el consum energètic augmenta.

La taula 18 presenta la distància recorreguda pel vehicle en el cicle suposat.

Seqüència	a(m/s ²)	v(km/h)	Distància(m)
1	0,83		10,41
2		15	62,50
2'	-0,83		10,42
3	0,42		47,25
4		25	208,34
4'	-0,42		47,25
5	0,42		47,25
6		25	104,20
7	-0,55		7,00
8		15	62,50
9	-0,42		47,25
TOTAL			654,37

Taula 18. Distància recorreguda en un cicle

De manera general, l'energia demanada a la bateria es calcula:

$$E_b = E_m / \eta$$

On: η – rendiment del sistema, se suposa que té valor aproximat de 0.8

Doncs, per a cada nivell d'assistència l'energia demanada tindrà els valors, tal i com s'observa a la taula 19.

Nivell assistència (%)	Energia motor, E_m (Wh)	Energia demanada, E_b (Wh)
25	0.68	0.85
50	1.13	1.41
75	1.47	1.84
100	1.71	2.14
125	1.92	2.4

Taula 19. Energia demanada al motor

La capacitat de la bateria disposada és de 17Ah o 612Wh. El fabricant recomana no descarregar la bateria més de 80% de la seva capacitat, o sigui que la capacitat real serà:

$$08 \cdot 612 = 490 \text{Wh}$$

Més a més tenint en compte el sistema de llums de posició fixos de potència total aproximada:

$$\sum P = P1 + P2 + P3 = 10 + 3 + 3 = 16 \text{W}$$

Finalment, es pot calcular el número teòric de cicles i la distància total recorreguda. Pel cas de màxim nivell d'assistència el resultat és el següent:

$$N_{\text{cicles}} = \frac{C_{\text{bat}}}{E_b} = \frac{490 - 16}{2.4} = 197$$

I la distància recorreguda total serà:

$$N_{\text{cicles}} * D_{\text{cicle}} = 197 * 654.37 = 129 \text{km}$$

Com a conclusió es pot dir que l'autonomia trobada és de valor molt aproximat. A l'hora de conduir el tricicle s'ha de tenir factors importants, que disminuiran el temps d'autonomia de la bateria, com per exemple:

- Canvi de marxes: utilització de canvi integrat com la part de transmissió, influirà molt a l'hora de demanar l'energia al motor, ja que l'esforç exigit es proporcional a la relació de transmissió.
- Estil de conducció: acceleracions ràpides, frenades brusques, canvi de nivells d'assistència.
- Càrrega de transportació: els càlculs realitzats tenen en compte el pes màxim de tricicle.
- Pujades: al cas de ciutat de Girona és el factor important, ja que n'hi ha moltes pujades a les zones de Montjuïc o Montilivi.
- Frenada regenerativa: segons el fabricant el sistema de frenada regenerativa pot recuperar fins a 5% de l'energia.
- Llums: el sistema de llums direccionals.

Al cas de tenir una pendent de 10%, es pot suposar un cicle semblant, que consisteix d'etapes següents:

1. Acceleració de 0 a 10 km/h en 10 s $\rightarrow a=0.28 \text{m/s}^2$
2. Velocitat constant, $v=10 \text{km/h}$ durant $t=45 \text{s}$

3. Frenada fins a parada del tricicle
4. $a=1$.
5. Velocitat constant, $v=10\text{km/h}$ durant $t=30\text{s}$

Per a nivell d'assistència de 125%, el resultat d'energia necessària es pot observar a la taula 20.

Seqüència	a(m/s ²)	v(km/h)	Tt(Nm)	Tr(Nm)	Tm(Nm)	P(W)	E(Wh)
1	0,28		119,91	72,67	40,70	342,56	0,48
2		10	91,85	55,67	31,17	262,40	3,28
3	-0,28			0,00			
4	0,28		119,91	72,67	40,70	342,56	0,48
5		10	91,85	55,67	31,17	262,40	2,19
							6,42

Taula 20. Energia del cycle en una pendent

Es pot veure que al cas de realitzar un cycle suposat per una pendent, la demanda d'energia és 3 vegades major que al cas d'un cycle per un terreny pla.

ANNEX A.9 CÀLCUL DE CONDICIONS DE FRENADA REGENERATIVA

Objecte:

Calcular la velocitat mínima a partir de la qual es pot realitzar la funció de la frenada regenerativa

Dades:

V: Tensió del sistema	36V
Kb: Constant de la força contra electromotriu	6 rpm/V o 0.17 V/rpm

Procediment:

Com ja s'havia mencionat al capítol corresponent per a que l'energia pugui fluir de motor cap a bateria (en mode de generador), el voltatge induït per la força contra electromotriu ha de superar el voltatge del sistema en 1.4V. O sigui,

$$V_{bemf} = V + 1.4 = 36 + 1.4 = 37.4V$$

La BEMF induïda es calcula de manera:

$$E = Kb * \omega_m$$

On: ω_m – velocitat angular de motor en rad/s

D'aquesta manera es pot trobar la velocitat del motor necessària:

$$\omega_m = \frac{E}{Kb} = \frac{37.4}{0.17} = \mathbf{224.4rpm}$$

O en rad/s:

$$\omega_m = 224.4 * \frac{\pi}{30} = \mathbf{23.499rad/s}$$

Finalment, es pot trobar la velocitat lineal del tricicle:

$$v = \omega_m * R$$

On: R – radi de la roda motriu, R=0.33m

Doncs, s'obté:

$$v = 23.499 * 0.33 = \mathbf{7.76m/s = 27.9km/h}$$

ANNEX B. MANUAL D'ÚS

Objecte:

Facilitar la comprensió de les funcions del tricicle a l'hora d'utilitzar-lo.

1. Recomanacions per una conducció segura:

- Respecti les normes de circulació.
- Revisi regularment l'estat del tricicle per assegurar-se que aquest es troba en les condicions òptimes de circulació (desgast dels frens, cargols descollats, pressió de les rodes, ajust del manillar i del seient, etc.)
- Comprovi que no hi hagi res que impedeixi una bona visibilitat. Ajusti la posició dels retrovisors a les seves necessitats de visió.
- Tingui el control del tricicle en tot moment, circulant a una velocitat raonable segons cada situació.
- Circulant de nit, tingui sempre els llums davanters i posteriors encesos.
- En situacions de pluja circuli amb major precaució. Redueixi la velocitat a la que aniria normalment i recordi que la visibilitat és menor.

2. Autonomia de la bateria

- La distància màxima que es pot arribar a recórrer amb una bateria totalment carregada depèn, sobretot, del pes de la càrrega que es transporti i del nivell d'assistència que s'utilitzi (recordar que el motor disposa de tres nivells d'assistència per tal de subministrar més o menys parell segons convingui).
- Altres factors que poden influir en la disminució de la durada de la bateria són la circulació en pendent ascendent, una alta temperatura ambiental, la fricció dels frens, la pressió dels pneumàtics, la direcció del vent i l'estil de conducció.

3. Carregar la bateria

- La bateria de què disposa el tricicle no té "efecte memòria", per tant no és necessari que estigui completament descarregada per connectar-la al carregador. Així mateix, no cal realitzar una càrrega completa abans del següent ús.

- Per carregar la bateria, es pot fer tant retirant-la del vehicle i emportant-te-la, com posada en la seva ubicació corresponent dins el vehicle.
- Si es carrega la bateria des del mateix vehicle, asseguris que el sistema de pedaleig assistit està apagat.
- El carregador s'ha de connectar a una corrent de 220V. Per comprovar que realment s'està carregant la bateria, observi que s'encén un LED vermell en el carregador.
- Quan el LED vermell passi a ser de color verd, significarà que la bateria està carregada el 100%.

4. Advertències de seguretat

- No tiri la bateria al foc.
- No utilitzi aquesta bateria per altres dispositius.
- Utilitzi només el carregador subministrat per la càrrega de la bateria.
- No desmunti ni modifiqui la bateria.
- No submergeixi mai la bateria sota aigua.
- No exposi la bateria a temperatures superiors a 45°C.
- No desmunti ni modifiqui el carregador.
- No utilitzi el carregador per carregar altres bateries.
- No cobreixi el carregador ni col·loqui objectes sobre seu.
- Eviti qualsevol impacte fort en el motor.
- En cap cas obri el motor.

5. Responsabilitats

- El fabricant no assumeix cap responsabilitat si la caixa portaequipatges és una altra diferent a la que incorpora el tricicle de càrrega. Tampoc assumeix cap responsabilitat en posteriors usos que s'allunyin de les funcions per les quals ha estat dissenyat el tricicle.

- El fabricant no es responsabilitza de danys sobre el tricicle si en aquest s'observen reparacions no realitzades pel propi fabricant del tricicle. Tampoc s'assumeix cap responsabilitat en el cas que s'hagin muntat peces que no siguin originals del fabricant.
- El fabricant no assumeix cap responsabilitat per danys sobre el vehicle en el cas que aquest hagi estat usat per terceres persones. Tampoc es responsabilitza de mal funcionaments de la bateria per no fer cas de les recomanacions pel seu correcte manteniment.

ANNEX C. FITXA TÈCNICA MOTOR

HT 2425





FRONT WHEEL MOUNTING

Technical details

Motor type	Brushless direct drive	Magnet width	24 mm
Output range	250 - 1500 Watt	Poles	23 pair
Voltage range	24 - 48 Volt	Hall sensors	No
Maximal Amp	40 Amp	Bearings	NSK industrial
RPM / V	6	Sealings	Yes
Torque	40 - 70 Nm	Motor phase plug	3 x Anderson PP45
Efficiency	83%	Hall sensor plug	n/a
Weight	5,5 kg		
Drop out	100 mm		
Disc brake mounting	Yes		
Sprocket gear	n/a		
Front or rear wheel	Front wheel		
Controller type	Sensorless controllers		

ALSO AVAILABLE WITH RIM & SPOKES

Spokes	SAPIM 125G INOX (size = 2,6 mm)
Rim	EXAL EX19 (24" - 29") / XL25 (20")
Rim sizes	20", 24", 26", 28" and 29er



AVAILABLE WITH RIM & SPOKES





HT 2425

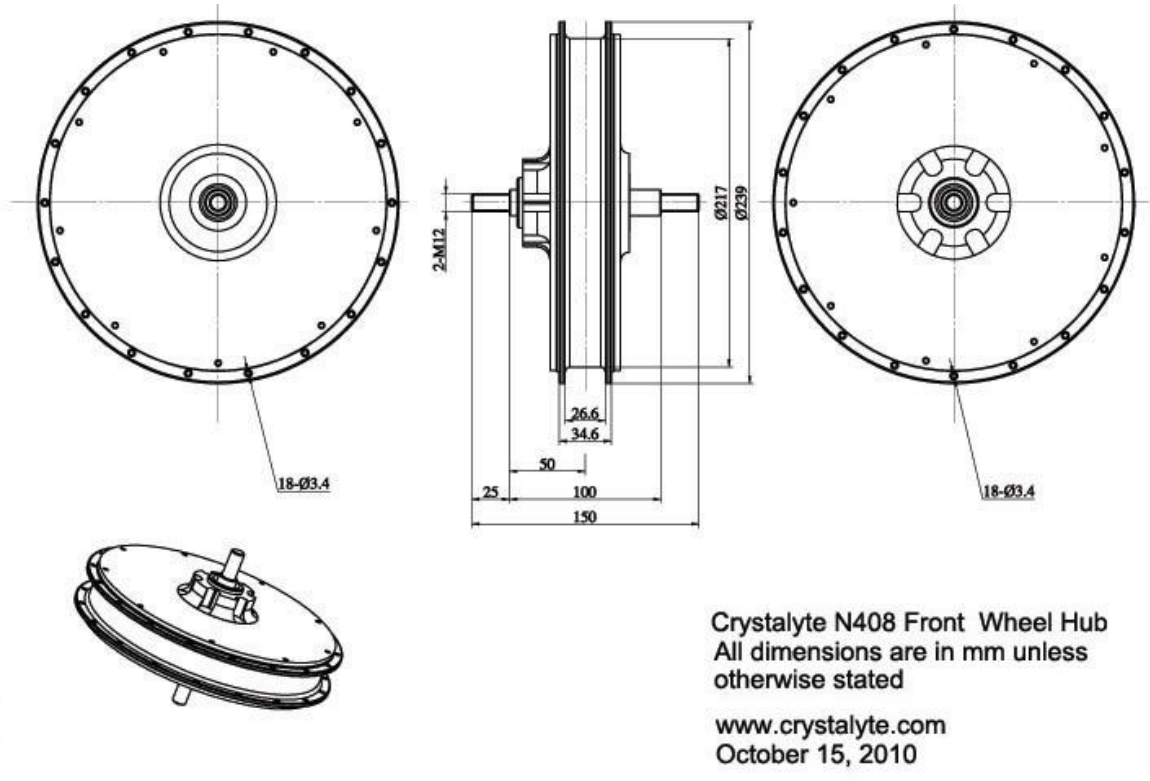
ORDER ONLINE

www.crystalyte-europe.com



Makes you want to drive electric

e-dr bvba • Hemelrijken 3a • 2890 Sint-Amands • Belgium • +32 (0)52 555 840 • info@crystalyte-europe.com



El redactor: Pavlo Slastion

Girona, 3 de setembre de 2015