



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Estudi del reemplaçament del sistema d'accionament convencional d'una instal·lació de transport per cable, per un sistema 'Direct Drive'

Document:

Annexos

Autor:

Quirc Pérez Farré

Director:

Antoni García Espinosa

Titulació:

Màster en Enginyeria Industrial

Convocatòria:

Primavera, 2022

TREBALL DE FI D'ESTUDIS



Agraïments

A totes aquelles persones que m'han aconsellat, orientat i han compartit la seva experiència laboral. Sense aquestes aportacions no hauria pogut desenvolupar aquest estudi.

Fent especial menció:

- Al professor Antoni García.
- A Patxi Garralda responsable d'enginyeria de l'estació de Boi Taüll.
- A Denís Coloma membre de l'equip tècnic de remuntadors de l'estació de Boi Taüll.

Resum

En aquest estudi es pretén analitzar la viabilitat tècnica i econòmica d'implementar un accionament directe en un remuntador de petita mida, com és el cas del telesquí.

Per fer-ho s'establiran els requisits tècnics i econòmics, en funció de les característiques de l'emplaçament i el tipus d'instal·lació, per així poder dimensionar, seleccionar i modelitzar el sistema d'accionament directe.

Un cop analitzat els resultats de les simulacions, es determina que l'accionament des d'un punt de vista tècnic és viable, de fet permetria millorar les prestacions cinemàtiques de la instal·lació, així com, millorar el rendiment global de la instal·lació tot reduint els costos de manteniment i reparació.

Tanmateix, no compleix amb el requisit econòmic. El cost de manteniment i de funcionament és inferior al sistema actual, no obstant l'elevat cost d'adquisició del nou sistema comprat amb l'actual desplaça el punt d'equilibri entre els dos sistemes fins a aproximadament els 39 anys.

Així doncs, es conclou que difícilment es produirà la implementació d'aquesta tecnologia en aquests remuntadors de petita mida.

Abstract

This study aims to analyse the technical and economic feasibility of implementing a direct drive in a small lift, such as the ski lift.

To do so, the technical and economic requirements will be established, depending on the characteristics of the site and the type of installation, in order to be able to size, select and model the direct drive system.

Once the results of the simulations have been analysed, it is determined that the direct drive is feasible from a technical point of view, in fact it would allow improving the kinematic performance of the installation, as well as improving the overall performance of the installation, reducing maintenance and repair costs.

However, it does not meet the economic requirement. The cost of maintenance and operation is lower than the current system. But the high acquisition cost of the new system compared to the current one, it shifts the balance point between the two systems to approximately 39 years.

Thus, it is concluded that it will be difficult to implement this technology in these small-sized lifters.



Declaració d'honor

Declaro que, el treball en aquesta Tesi de Màster és completament el meu propi treball, cap part d'aquesta Tesi de Màster es pren de la feina d'altres persones sense donar-los crèdit, totes les referències han estat clarament citades.

Entenc que la infracció d'aquesta declaració em deixa subjecte a les accions disciplinàries previstes per la Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH.

Nom de l'estudiant:

Signatura:

Data:

Quirc Pérez Farré

17/06/2022

Títol de la tesi : **Estudi del reemplaçament del sistema d'accionament convencional d'una instal·lació de transport per cable, per un sistema 'Direct Drive'**

Taula de continguts

1.	Objecte del treball	1
2.	Abast	1
3.	Requisits.....	2
4.	Justificació	3
5.	Caracterització del tipus de remuntador, traçat i emplaçament	4
5.1	Estudi del traçat.....	6
5.2	Estudi de les condicions meteorològiques	6
5.3	Característiques de funcionament	7
5.4	Subministrament elèctric.....	7
6.	Descripció dels principals sistemes el remuntador	8
6.1	Estructura del remuntador	8
6.2	Sistema de tensió.....	12
6.3	Sistema de frenada de servei i emergència	12
6.4	Sistemes de seguretat	12
6.5	Sistema de control i comunicacions	13
7.	Descripció del sistema motriu actual	14
8.	Estat de la tecnologia	16
9.	Normativa	18
10.	Estimació dels requeriments de parell i potencia.....	19
10.1	Descripció i quantificació dels elements.....	22
10.2	Càlcul del parell i la potencia màxima.....	26
10.3	Resum de resultats i comprovació de valors	33
10.4	Corbes de parell i potència en diferents escenaris de funcionament	33
11.	Estudi de les diferents màquines elèctriques rotatives	37
11.1	Classificació dels motor elèctrics.....	37
11.1.1	Corrent continu	37
11.1.2	Corrent altern	39
12.	Selecció de la tipologia de motor	43
13.	Descripció del motor seleccionat	44
13.1	Implementació.....	44
14.	Modelització del motor	47
15.	Control	49
15.1	Introducció de dades al model	59

15.2	Sintonització dels controladors PI de corrent i velocitat.....	60
15.2.1	Sintonització del Pi de corrent	60
15.2.2	Sintonització del PI de velocitat.....	62
16.	Simulacions.....	63
16.1	Simulació escenari A amb els requeriments cinemàtics actuals	63
16.1.1	Resposta de la velocitat.....	63
16.1.2	Corrents al motor	64
16.1.3	Tensions al motor.....	65
16.2	Simulació escenari A amb nous requeriments cinemàtics	65
17.	Anàlisi de costos.....	67
18.	Avaluació mediambiental	69
19.	Planificació	70
20.	Conclusions.....	71
19.	Bibliografia	72

Llistat de figures

Figura 1 Antic telecadira de Puig Falco.....	4
Figura 2 Estació inferior i línia del nou telesquí	4
Figura 3 Croquis d'un telesquí.....	5
Figura 4 Model de terreny extret del "Google Earth".....	6
Figura 5 Croquis estació inferior	8
Figura 6 Croquis estació superior	9
Figura 7 Pilona tubular telesquí, politges de suport, la pilona rep esforços de compressió	10
Figura 8 Perxa de disc.....	11
Figura 9 Estructura del cable	11
Figura 10 Armari de proteccions i control elèctric actual.....	13
Figura 11 Croquis i model 3D del motor reductor.....	14
Figura 12 Esquema del sistema de control de l'accionament "Direct Drive". [6].....	17
Figura 13 Croquis de forces i moments en el remuntador.	19
Figura 14. Rampa d'acceleració de la instal·lació	26
Figura 15. Croquis de forces	27
Figura 16 Velocitat remuntador durant la rampa d'acceleració.....	33
Figura 17 Corbes moment i potència en rampa d'acceleració (vent 15 m/s).....	34
Figura 18 Corbes moment i potència en rampa d'acceleració (vent 4 m/s).....	35
Figura 19 Corbes moment i potència en rampa d'acceleració (vent 4 m/s).....	36
Figura 20 Màquina de corrent continu.....	37
Figura 21 Motor d'inducció amb rotor curtcircuitat	39
Figura 22 Motor síncron amb rotor bobinat.....	40
Figura 23 Màquina síncrona d'imants permanents	42
Figura 24 Motor Parker models TMW	44
Figura 25 Volant motriu telecadira	45
Figura 26 Diagrama fasorial del model d-q del motor.....	47
Figura 27 Esquema del model de simulació	49
Figura 28 Blocs consigna de velocitat	50
Figura 29 Blocs càrrega	50
Figura 30 Bloc PI controlador velocitat.....	51
Figura 31. Bloc PI controlador intensitat.....	52
Figura 32 Bloc de transformació "d-q" a "U-V-W".	53
Figura 33 Blocs per obtenir les senyals de control	54
Figura 34 Blocs que modelitzen l'inversor	55
Figura 35 Bloc de transformació "d-q" a "U-V-W".	56

Figura 36 Subsistema motor	57
Figura 37 Conjunt blocs A.....	57
Figura 38 Conjunt blocs B	57
Figura 39 Conjunt de blocs C	58
Figura 40 Diagrama de bolcs dels controladors d'intensitat.....	60
Figura 41 Diagrama de Bode del controlador PI d'intensitat	61
Figura 42 Diagrama de bolcs del controlador de corrent.....	62
Figura 43 Resposta de la velocitat amb els requeriments cinemàtics actuals	63
Figura 44 Corrent I_q i I_d del motor.	64
Figura 45 Tensions de fase de consigna.....	65
Figura 46 Resposta de la velocitat amb els nous requeriments cinemàtics.....	65
Figura 47 Corrent I_q i I_d del motor.	66
Figura 48 Diagrama de Gantt.....	70



Llistat de taules

Taula 1 Rendiment conjunt motor reductor.	15
Taula 2 Moments inercials estació inferior.....	22
Taula 3 Moments inercials línia ascendent.....	23
Taula 4 Moments inercials línia descendent.....	24
Taula 5 Elements de moviment rectilini.....	25
Taula 6 Parell total escenari A.....	30
Taula 7 Parell total escenari B.....	32
Taula 8 Taula comparativa de prestacions.....	66
Taula 9 Avaluació mediambiental.....	69

1. Objecte del treball

Estudi del reemplaçament del sistema d'accionament convencional d'una instal·lació de transport per cable, per un sistema 'Direct Drive'. Estimació dels requisits tècnics, predisseny del sistema motriu i comparativa entre les dues tecnologies.

2. Abast

En aquest estudi es pretén dimensionar el sistema motor d'una instal·lació de transport per cable, utilitzant la tecnologia d'accionament directe o més coneguda en anglès, com "direct drive". Aquest estudi se centrarà en el cas concret del telesquí de Puig Falcó a l'estació de Boí Taüll, a la província de Lleida.

Es pretén estimar els requeriments mecànics del remuntador, per així poder dimensionar, seleccionar i modelitzar un sistema d'accionament directe. Tot comparant les dues tecnologies, per determinar la viabilitat d'aplicació d'aquesta tecnologia en aquest tipus de remuntadors.

El projecte seguirà la següent estructura, primerament s'estudiarà el remuntador definit tots els sistemes que el componen, especialment el sistema motor, tot recopilant les especificacions tècniques i dimensionals més destacables. Seguidament, amb les dades obtingudes es calcularan els requisits tècnics del sistema de propulsió, característics per cada instal·lació i traçat. Posteriorment s'estudiaran els diferents tipus de motors que se solen utilitzar per a aquesta tecnologia i se seleccionarà el més adient. Un cop elegit el tipus de motor es dimensionarà i es modelitzarà reproduint els escenaris de funcionament més freqüents. Finalment, s'avaluarà la viabilitat tècnica i econòmica d'aquest tipus d'accionament comparant-la amb la tecnologia actual.

Així doncs, els principals punts d'aquest treball seran els següents:

- Caracterització del tipus de remuntador, traçat i emplaçament.
- Estudi del sistema motor actual.
- Estat de la tecnologia d'accionament directe en aplicacions similars.
- Determinació dels requisits tècnics del sistema motor.
 - Càlcul a partir de les característiques del traçat i tipus de remuntador.
 - Comprovació a partir de les especificacions del sistema actual.
- Estudi dels diferents tipus de motor vàlids per un accionament "Direct Drive".
- Selecció i dimensionat del motor.
- Modelització del sistema, en els principals escenaris de funcionament.
 - Utilitzant l'eina de Matlab Simulink.
- Anàlisi de viabilitat i conclusions

Un cop finalitzat l'estudi es presentaran els següents documents:

- Memòria del treball
- El pressupost del treball
- Autoinforme de qualitat

3. Requisits

S'han estipulat una sèrie de requeriments genèrics, fàcilment extrapolables a altres instal·lacions amb la finalitat d'avaluar la viabilitat tècnica i econòmica d'aquesta tecnologia.

Requisits tècnics

- Les prestacions del nou sistema motor han de ser quantitativament superiors o iguals a l'actual. Les principals especificacions analitzades seran el parell màxim i nominal disponible, la potència i el rang de velocitats d'operació.
- La fiabilitat i eficiència del sistema també ha de ser superior o igual a l'actual, tant des del punt de vista mecànic com elèctric.
- Els costos derivats del manteniment han de ser inferiors o iguals a l'actual. Aquest requisit ja està implícit amb aquesta tecnologia, ja que es caracteritza per no comptar amb una caixa reductora, per tant, hi ha menys parts mòbils en el sistema.

La instal·lació i transport del nou sistema no ha de suposar una major complexitat que l'actual, és per aquest motiu que s'afegeixen els següents requisits:

- El diàmetre del nou motor, no hauria de superar el diàmetre del volant motor actual de 1.650 mm, ja que superar aquest límit implicaria un redisseny considerable de l'estructura metàl·lica que conforma l'estació.
- La massa del nou sistema motriu no podrà superar en més d'un 30% la massa del sistema actual d'1,5 tones.

Requisits econòmics

Pel que fa als requeriments econòmics s'avaluaran els costos inicials dels equips i d'instal·lació, així com, els costos derivats de manteniment preventiu i del consum elèctric per a un període de quinze anys en els dos casos.

Es considerarà que s'assoleix aquest requisit si els suma de costos totals del nou sistema és inferior a l'actual.

4. Justificació

Aquest estudi és la continuació del treball de fi de grau on s'avaluava la viabilitat de reemplaçar el telecadira biplaça instal·lat per un telesquí.

En el transcurs d'aquests dos anys aquest reemplaçament s'ha efectuat i actualment hi ha instal·lat un telesquí amb accionament convencional, aquest compta amb un motor asíncron i una caixa reductora helicoidal.

Com s'ha esmentat anteriorment en aquest estudi és pretén determinar la viabilitat d'aplicació de la tecnologia d'accionament directe, per a instal·lacions de petita envergadura, com és el cas dels telesquís.

Fabricants lideres en el sector del transport per cable com Leitner Ropeways o Doppelmayr-Garaventa, ja han presentat aquest tipus de sistema motor per instal·lacions de major capacitat, telecadires i telecabines principalment. Això no obstant, en el moment de redacció d'aquest estudi no hi ha cap fabricant que ofereixi aquest tipus de sistema de propulsió per als telesquís.

D'altra banda, destacar que a les estacions d'esquí Espanyoles i Franceses l'ús del telesquí està molt estès, sols a Espanya ja hi ha 110 telesquís, xifra que suposa un 37% del total dels remuntadors instal·lats. Al país veí, França, aquesta xifra augmenta fins als 1.300 aparells aproximadament, aquesta xifra no és estranya, ja que és el país on es van desenvolupar i utilitzar per primer cop aquest tipus de remuntador a principis del segle XX.

Aquest nou sistema motor aparentment té clars avantatges respecte a l'actual, no compta amb una caixa d'engranatges, així doncs, té un menor nombre de parts mòbils que sol estar associat a un menor manteniment, ja que, el motor està directament connectat al volant motor mitjançant un eix.

Com que no hi ha un reductor tots els costos associats aquest element desapareixen. En aquests costos es contempla les inspeccions rutinàries, així com les inspeccions en profunditat, en què és habitual haver d'extraure el reductor i enviar-lo una empresa certificada per a fer aquests tipus d'inspecció, altrament també desapareix la despesa en consumibles com ara l'oli lubricant o bé les juntes. D'altra banda, la vida útil d'aquests equips sol ser inferior a la dels motors elèctrics.

En haver-hi menys elements mòbils es redueixen les pèrdues de potència augmentant l'eficiència. Altrament, la velocitat de rotació del motor serà molt inferior, reduint les pèrdues de fregament i la problemàtica d'escalfament excessiu en element crítics com ara els coixinets.

Els motors utilitzats seran motors síncrons en lloc dels d'inducció utilitzats en l'actualitat, permeten un control de la velocitat molt més precís i exacte. Amb baixes vibracions i baix nivell sonor. Sent menys sensibles a fluctuacions de tensió o fallades de corrent.

Altrament, el control vectorial de velocitat permetrà absorbir les possibles variacions de càrrega de forma més ràpida i controlada.

Totes aquestes característiques contribuiran a incrementar la comoditat dels usuaris gràcies a un moviment suau i sense sacsejades en iniciar i parar.

I finalment, la possible reducció del consum elèctric també és un punt important a destacar, ja que les estacions d'esquí tenen una gran demanda energètica, i actualment s'està posant en dubte la seva viabilitat des d'un punt de vista mediambiental.

5. Caracterització del tipus de remuntador, traçat i emplaçament

El remuntador seleccionat és el teleesquí recentment inaugurat, 22 de gener de 2022, a l'estació d'esquí de Boí Taüll al Pirineu de Lleida.

Aquest teleesquí proporciona accés a la cota esquiuable més alta del Pirineu a una altura de 2.750 m.

Com s'ha comentat anteriorment aquest remuntador es va reemplaçar, ja que l'antiga instal·lació, un telecadira biplaça de pinça fixa, estava molt temps aturada a causa de les inclemències meteorològiques extremes de la zona. [1];[2]



Figura 1 Antic telecadira de Puig Falco



Figura 2 Estació inferior i línia del nou teleesquí

Aquest nou tipus d'instal·lació per cable permet operar en unes condicions meteorològiques més desfavorables, pel fet que l'estructura té una menor àrea exposada al vent. Altrament, en tractar-se d'una instal·lació d'arrossegament, l'usuari està tot el temps en contacte amb la pista de neu, per tant, no apareix la problemàtica del vaivé dels vehicles quan el vent actua perpendicular a la línia, d'altra banda, en cas d'aturada per fallada en el sistema motriu o falta de subministrament elèctric, l'usuari pot deixar la perxa, no és necessari disposar d'un sistema de propulsió auxiliar, motor tèrmic, ni és necessari un equip de rescat.

Es tracta d'un teleesquí de funcionament continu amb perxes desembragables que s'entreguen de forma automàtica.

Aquest tipus de teleesquí es caracteritzen perquè les perxes tenen un mecanisme que els permet desenxar-se del cable. Aquestes per defecte, romanen a la base del teleesquí, a l'estació inferior, on està emplaçat l'accionament motor que propulsa d'instal·lació.

Quan un usuari es col·loca a la zona de sortida i s'aproxima manualment una perxa, s'activa el sistema de connexió automàtica que enganxa la perxa al cable tractor. En arribar l'usuari a l'estació superior, a la zona de desembarcament, que compta amb un nivell horitzontal per facilitar que l'usuari allibera de la perxa, aquesta retorna a l'estació inferior per la línia descendent o s'emmagatzema.

Aquesta estació inferior disposa d'una estructura per suportar i emmagatzemar totes les perxes de la línia, amb una capacitat de 93 perxes, quan no hi ha cap usuari en ella.

El moviment del cable transportador és circulant continu i no s'atura encara que no hi hagi cap usuari en la línia.

En el següent croquis es pot observar les diferents parts que conformen un telesquí i la seva disposició al llarg del traçat.

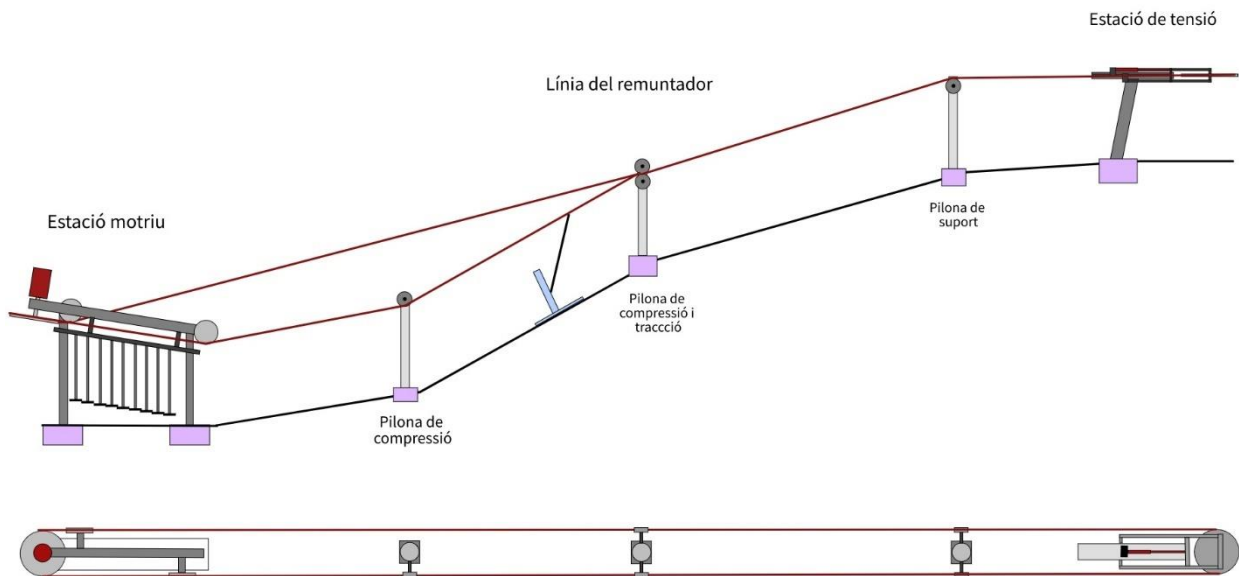


Figura 3 Croquis d'un telesquí

5.1 Estudi del traçat

El traçat de la línia és rectilini. Cobreix un recorregut de 659,6 m (longitud desenvolupada) i un desnivell de 207,5 m, amb un pendent mig teòric del 34% o el que és mateix amb una inclinació mitjana de 18,78° i un pendent màxim del 56,9%.

L'altitud de sortida és de 2.540,5 m i la d'arribada de 2.748 m.

El traçat transcorre just per la cresta de la muntanya deixant al remuntador totalment exposat a les inclemències meteorològiques.

La direcció de la línia és Sud-Nord, parteix del "Coll de Roies", estació inferior i transcorre per la cresta del vessant sud de la muntanya fins a arribar al pic de "Rapes Roies" on està situada l'estació superior. [1];[2]

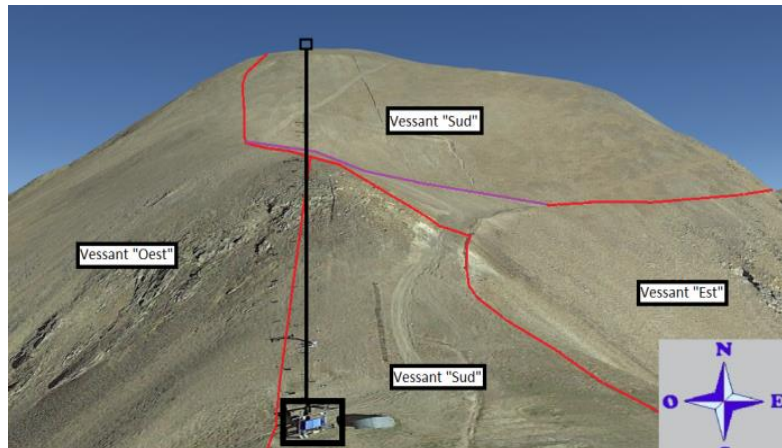


Figura 4 Model de terreny extret del "Google Earth".

5.2 Estudi de les condicions meteorològiques

En aquest apartat se centrarà únicament a avaluar les temperatures ambientals i es deixaran de banda altres afectes com és el cas del vent, que té una gran importància pel que fa al sistema estructural però menor en el cas del sistema motor.

La temperatura és un factor interessant a tenir en compte pel que fa a possibles problemes tèrmics, en els bobinats del nou motor.

La temperatura mitjana diürna en l'època hivernal, que és quan opera la instal·lació és d'aproximadament -3 °C.

Les temperatures màximes en les quals opera la instal·lació se solen produir a mitjans d'abril quan finalitza la temporada d'esquí, aquest valor pot estar entorn dels 7 °C.

I les temperatures mínimes se solen assolir a entre els mesos de febrer i gener, s'han registrat fins a -23 °C. La mínima diürna pot estar en torn dels -14 °C, tot i que en aquestes condicions no se sol operar la instal·lació, per la baixa demanda o bé perquè aquestes baixes temperatures van acompanyades de forts vents que impossibiliten l'obertura de l'estació.

Aquestes dades s'han extret de les dades enregistrades per l'estació meteorològica de Boí (2.535 m), que forma part del XEMEC, proporcionades pel Servei Meteorològic de Catalunya. Aquesta estació està a escassos 600 metres de la base de la instal·lació a una altura pràcticament idèntica, per tant, els valors obtinguts són molt representatius. [2]

5.3 Característiques de funcionament

Les característiques de funcionament del remuntador operant en règim nominal són les següents:

- Capacitat 900 usuaris/hora
- Velocitat 3,5 m/s
- Temps entre perxes 4 s
- Durada trajecte 3 min i 6 s

Aquests valors s'assoleixen quan les condicions meteorològiques són favorables, vents inferiors a 10 m/s, i amb un bon estat de la pista ascendent.

5.4 Subministrament elèctric

Al "Coll de Roies" on està instal·lada l'estació motriu del telesquí arriba una línia de mitja tensió de 25.000 V, aquesta està connectada a un transformador de 250 kVA amb una sortida de 400 V trifàsica.

6. Descripció dels principals sistemes el remuntador

Un remuntador està conformat per diferents subsistemes, els principals són; l'estructura metàl·lica incloent els vehicles i el cable d'acer, el sistema motor, el sistema de tensió, el de frenada de servei i emergència, sensors i actuadors de seguretat i finalment sistemes de control i comunicació. El correcte funcionament d'aquests sistemes són indispensables per al funcionament de la instal·lació. Aquests sistemes estan interconnectats entre si, mitjançant el sistema de control. [3];[5]

6.1 Estructura del remuntador

El fabricant del remuntador és GMM (Gimar Montaz Mautino), una empresa francesa líder en la construcció de telesquí a França i amb un important paper també dins d'Espanya.

- **L'estació inferior** és el model G1 T80, és on està muntat el sistema motor, de frenada i de control de la instal·lació, així com el magatzem de perxes.

La lletra "T" designa el model i el tipus d'estructura, que està formada per dues pilones en gelosia i un xassís per al suport dels mecanismes i guiatges, sobre el que va muntat el sistema motor.

La xifra 80 és el nombre de perxes pel que es va dissenyar aquesta instal·lació. Algunes dades destacables són:

- Model T80 (Recuperat d'una instal·lació en desús)
- Sentit de marxa a dretes
- Politja motriu 1,65 m
- Politges de compressió 1,55 m

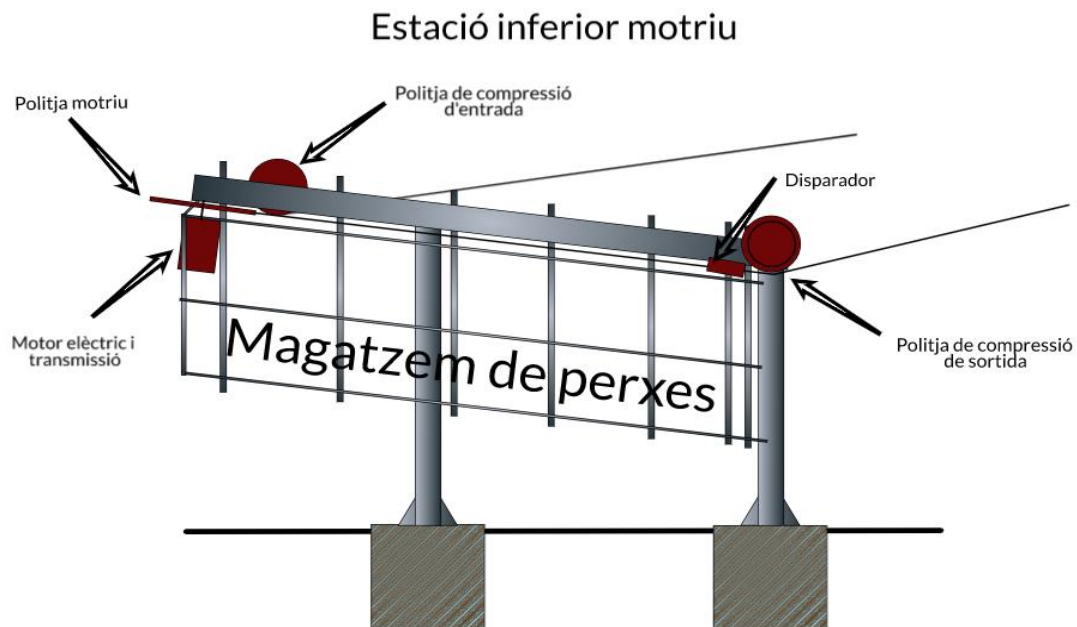


Figura 5 Croquis estació inferior

- **L'estació superior** és la que realitza la funció de tensió, el model és el LSP 9T del mateix fabricant, aquesta estació coneguda també com de retorn és del tipus LSP, és a dir, el desembarcament es realitza sota politja. Aquesta estació està composta per dues pilones tubulars que suporten la mènsula formada per dos rails que sostenen el carro de tensió constituït per la politja de retorn i la part mòbil del pistó.

Pel que fa al 9T, és la tensió màxima que és capaç de produir el sistema de tensió 9.000 daN.

Algunes dades destacables són:

- Estació superior LSP 9T (recuperat)
- Politja de retorn 3,5 m

Les dues estructures estan muntades sobre una llosa massissa de formigó armat.

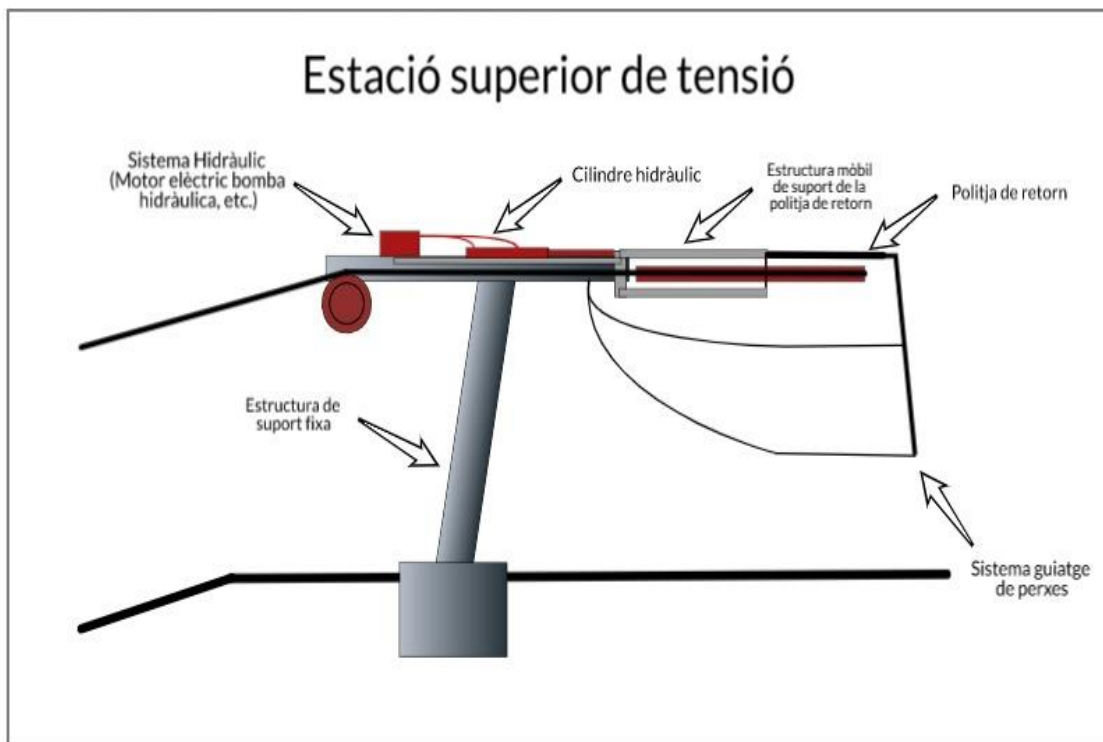


Figura 6 Croquis estació superior

- **La línia** està constituïda pels suports (pilones), els vehicles (perxes) i el cable transportador.

Elements de suport

Hi ha un total de 9 pilones tubulars a la línia, amb una altura compresa entorn dels 7 m. Un diàmetre d'aproximadament 400 mm i un gruix variable segons l'emplaçament i els esforços que rep. Cal destacar que al llarg de la línia hi ha pilones que suporten esforços de compressió i d'altres de tracció, ja que el cable ha de seguir el perfil del traçat i mantenir una altura constant. L'ample de via, o el que es el mateix la separació entre el ramal de cable ascendent i el descendent és de 3.5 m.

Sobre aquestes van muntades les mènsoles, fixades a les pilones mitjançant collarets, que suporten els cavallets mòbils on estan col·locades les politges que guien el cable. Aquestes estructures també, disposen d'escalera d'accés, amb passarel·les i baranes.

Totes les politges tenen la gola guarnida amb una banda de goma, per aconseguir un funcionament silenciós i evitar el desgast prematur de cable.

Les politges de la línia es distribueixen de la següent manera:

- A la línia ascendent hi ha 4 politges de suport (cable per damunt) , 2 politges de compressió (cable per sota) i 3 mixtes. A una altura de 5,5 m respecte al terreny.
- La línia descendent compta amb 4 politges de suport, 1 politja de compressió i 2 mixtes. A una altura de 6,5 m.

Hi ha tres diàmetres diferents d'1,55, 1,05 i 0,85 m.



Figura 7 Pilona tubular telesquí, politges de suport, la pilona rep esforços de compressió

Els vehicles

Els vehicles d'aquest remuntador són perxes desembregables del tipus disc.

La perxa té un sistema d'amortiment, format per una barra telescòpica, que conté un cilindre pneumàtic amb un motlle, aquest sistema absorbeix part de l'impuls inicial que rep l'esquiador durant l'acceleració i quan aquest allibera la perxa.

El salient de plàstic en el qual es recolza l'usuari s'anomena disc, ja que té aquesta forma.

La fixació de la perxa amb el cable no és permanent, la pinça és mòbil i s'allibera del cable quan retorna a l'estació inferior.

La instal·lació compta amb 93 perxes.

Altres dades destacables són:

- Longitud en repòs 4,49 m
- Longitud estirada 7,55 m
- Massa unitària 12 kg
- Separació entre perxes 14 m

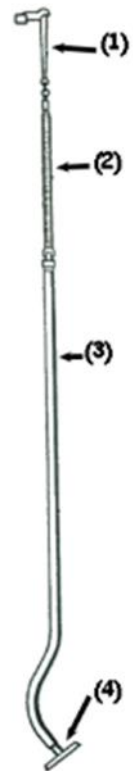


Figura 8 Perxa de disc

El cable

El cable transportador realitza dues funcions, per una banda, suporta parcialment a l'usuari, i d'altra banda, transmet la força per al moviment.

El constructor és l'empresa Arcelomittal la major companyia siderúrgica a nivell mundial.

Aquest cable d'acer de residència 210, amb ànima sintètica i acabat galvanitzat té un diàmetre de 18 mm i una resistència a la ruptura de 21.500 daN.

L'altura de cable al llarg de tot el recorregut està dins del mínim establert pel reglament de 2,5 m i és constant amb un interval de +/- 20 cm.

El cable té una composició 6x7+1 Lang a dreta. Compta amb 6 cordons i un total de 42 fils.

La Tensió nominal del cable és de 3.250 daN.

La densitat lineal d'aquest component, és d'aproximadament 1,11 kg/m. I la longitud total del mateix és:

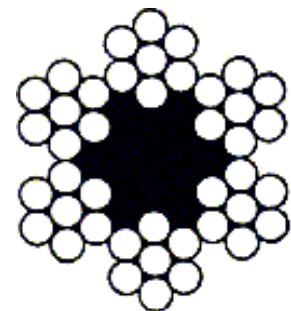


Figura 9 Estructura del cable

$$Long. cable = 2 * 659,6 + 0,5 * \pi * 3,5 + 0,5 * \pi * 1,65 = 1.327,3 m \approx 1.330 m$$

6.2 Sistema de tensió

El sistema de tensió està constituït per un motor elèctric asíncron de gàbia d'esquirol, acoblat a una bomba hidràulica que proporciona el cabal i la pressió necessaris per al pistó hidràulic.

La tensió nominal que genera el pistó és de 6.500 daN a una pressió de 120,6 bars, produint una tensió en el cable de 3.250 daN.

La tensió màxima a la qual pot operar és de 9.000 daN. La cursa del cilindre és 1,75 m, que pot produir un estirament màxim del cable de 3,5 m per contrarestar les dilatacions tèrmiques, les variacions de càrrega mecànica i l'estirament natural del mateix al llarg de la seva vida útil.

6.3 Sistema de frenada de servei i emergència

El sistema de frenada per aquest tipus de remuntadors es força senzill. Per una banda, existeix el fre de servei, quan la instal·lació està en marxa i es desitja aturar-la, el control de velocitat inicia una rampa controlada de desacceleració de la instal·lació, un cop la velocitat del remuntador és pràcticament zero actua l'electrofrè per evitar el retrocés. Un fre d'accionament elèctric que actua a l'eix ràpid del reductor.

L'electrofrè és un fre de disc electromagnètic, accionat amb corrent continu que s'allibera elèctricament i s'aplica amb la força provinent d'una molla.

En cas que de què el fre de servei falles existeix un segon fre d'emergència, aquest és un fre centrífug de trinquet que també actua a l'eix ràpid del reductor i evita el retrocés de la instal·lació en cas d'un funcionament anòmal del fre de servei o pèrdua del subministrament elèctric.

6.4 Sistemes de seguretat

Els sistemes de seguretat es poden dividir en dos subsistemes, el subsistema de control de cable i el sistema de seguretat elèctric.

El sistema de control de cable, comprova:

- Que el cable circuli pels guiatges de la línia, mitjançant interruptors al llarg de la mateixa, que serien activats en cas de descarrilament.
- La tensió aplicada al cable per evitar que aquest patini en la politja motriu, descarrili o bé que es produeixi una sobretensió.
- Si l'usuari a l'estació de retorn ha pogut alliberar la perxa correctament, i si aquesta a l'estar descarregada ha recuperat l'element extensible.
- I la velocitat d'aquest, que en cap cas pot ser negativa, ni superar els 3,5 m/s.
- D'altra banda existeixen polsadors manuals de parada a les estacions.

En el cas molt poc probable de ruptura del cable es dispararien varis d'aquests sensors. Si qualsevol d'aquests sensors s'activa, automàticament s'aplica el fre d'emergència i servei i s'atura la instal·lació. [3];[5]

Seguretat elèctrica

Tant el circuit que alimenta els dispositius de seguretat com el sistema motor, de frenada, de tensió i de control estan protegits automàticament contra curtcircuits, sobrecarregues, sobretensions i subtensions i fuges (descàrregues elèctriques, contactes accidentals càrregues electroestàtiques, etc.)

Totes les parts metàl·liques de la instal·lacions exposades estan posades a terra.

6.5 Sistema de control i comunicacions

El conductor de la instal·lació disposa d'un panell de control col·locat en un petit edifici protegit de les inclemències meteorològiques. En aquest edifici també es troben emplaçats tots els quadres elèctrics de distribució, protecció i mesura així com els variadors de freqüència per al sistema motor.

Aquest edifici està just al costat de la estació inferior.

En aquest quadre apareix informació referent a la velocitat i tensió del cable, així com informació de valors elèctrics de sistema motor, principalment de tensió i corrent.

El conductor té a l'abats els següents comandaments bàsics: d'aturada, rearmament i posada en marxa de la instal·lació entre d'altres de més específics.

Com s'ha comentat anteriorment aquest sistema interconnecta la resta de sistemes.



Figura 10 Armari de proteccions i control elèctric actual

7. Descripció del sistema motriu actual

En aquest apartat s'estudiarà en detall el sistema motor.

Conèixer les especificacions del sistema actual en profunditat permetrà posteriorment validar resultats i realitzar una comparació més acurada.

El sistema actual està constituït per un motor asíncron i una caixa reductora, alimentat per un variador de freqüència. El variador de freqüència està controlat per un PLC que permet operar el remuntador a un rang de velocitats continu de 0 a 3,5 m/s, així com programa rampes d'acceleració i desacceleració. En condicions normals el remuntador opera a 3,5 m/s.

El fabricant del sistema de propulsió actual és SEW-EURODRIVE empresa amb seu a Bruchsal, Alemanya. L'empresa subministra el conjunt motor i reductor assemblejat des de fàbrica. La referència del model és RF167 AM280/RS.

El motor està refrigerat per aire, amb un ventilador que està muntat a la part superior d'aquest impulsat per l'eix del motor. El reductor no compta amb cap sistema de refrigeració auxiliar. L'aïllament dels bobinats és classe F amb una temperatura màxima admissible de 155 °C. Com es pot observar a continuació, el motor reductor està muntat verticalment en la mateixa direcció de l'eix de la politja motriu, en la part superior de l'estació. El conjunt motor reductor té una longitud de 1.721 mm i una massa combinada de 1.452 kg.

D'altra banda, destacar que el conjunt està totalment exposat a les inclemències meteorològiques, no compta amb cap mena de coberta.

La protecció amb què compta el motor és la IP 55, és a dir, protecció contra dipòsits del pols i aigua a pressió en qualsevol direcció.

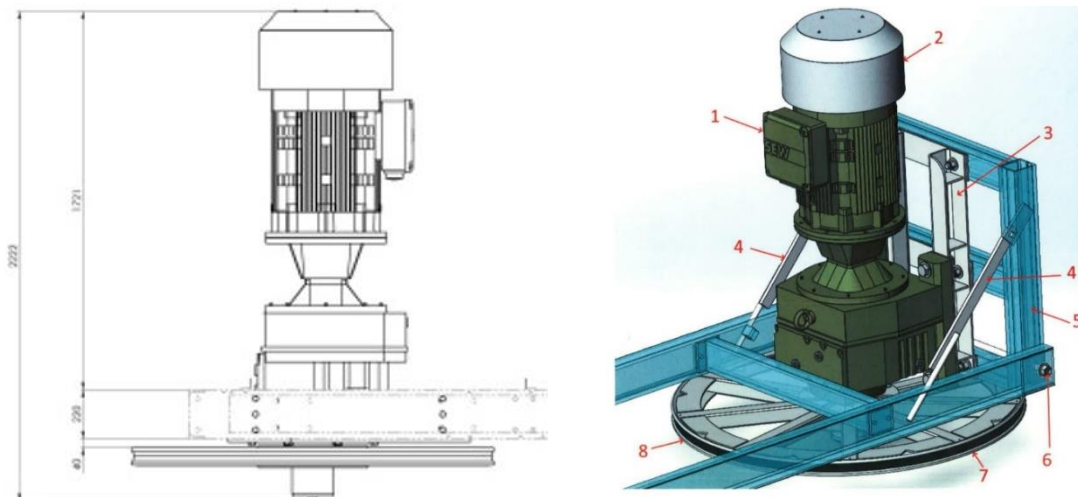


Figura 11 Croquis i model 3D del motor reductor.

Motor

El motor es un motor asíncron trifàsic de 400/690 V, en aquest cas està connectat en triangle, alimentació a 400 V.

Dades característiques en S1, servei continu:

- Potència 75 kW
- $\cos(\varphi)$ 0,79
- Freqüència nominal 50 HZ
- Pols 4
- Connexions 400/690 V i 143/83 A (T/E)
- Tensió de línia 400 V

- Velocitat Nominal 1482 rpm (155,6 rad/s) -> velocitat remuntador 3,2 m/s
- Parell nominal 483 Nm

Reductora

Reductora helicoidal RF167

- Parell nominal sortida 19.300 Nm
- Relació de transmissió 39,92

Els rendiment del conjunt en funció de la càrrega són els següents:

Taula 1 Rendiment conjunt motor reductor.

Càrrega	Parell equivalent, eix lent, a velocitat nominal (3.5 m/s)	Rendiment total del conjunt
100 %	19.300 N·m	95 %
75 %	14.475 N·m	95,3 %
50 %	9.650 N·m	94.9 %

8. Estat de la tecnologia

Principals constructors de mitjans de transport per cable

A escala mundial existeixen molt poques empreses que fabriquin mitjans de transport per cable, excloent el mercat xinès que té els seus propis constructors i que ara per ara operen únicament dins del país, hi ha aproximadament unes 20 empreses actives.

Altrament, una gran quota del mercat està sota el domini de dos grans grups empresarials.

Per una banda, el grup Doppelmayr-Garaventa. Doppelmayr és una empresa àustriaca amb una gran història dins del sector, que l'any 2002 va adquirir Garaventa, una empresa suïssa també referent. Convertint-se en l'empresa que més remuntadors ha instal·lat a tot el món i operant en els 5 continents.

I, d'altra banda, Leitner-Poma, propietat de la companyia italiana HTI Group. Creada a partir de l'empresa austríaca Leitner fundada el 1888, que adquirí l'any 2000 el fabricant francès Poma Galski.

Així doncs, el nucli empresarial d'aquest sector es troba en els estats Alps: aquest fet no és d'estranya, ja que inicialment totes les instal·lacions de transport per cable estaven vinculades, amb el sector de la neu i és en la regió alpina on es va desenvolupar abans.

No obstant en l'actualitat el mercat urbà ha crescut de forma destacable. Sobretot en les capitals dels països Andins. [6]

L'ús de l'accionament directe

Tots dos constructors han aplicat la tecnologia de l'accionament directe en els seus remuntadors en el cas de Doppelmayr-Garaventa es coneix amb el nom de comercial de DDD, Doppelmayr Direct Drive i en el cas de Leitner-Poma com LeitDrive.

En el cas de Leitner actualment, ja ha instal·lat més de 200 remuntadors amb aquesta tecnologia. Una de les primeres instal·lacions amb comptar amb aquesta tecnologia va ser un telecabina GD 10 (10 persones per cabina), amb una capacitat de 2400 persones per hora i una velocitat de 6 m/s a Kitzbühel, Àustria, al 2013.

D'altra part, Doppelmayr també compta amb un sistema mix anomenat DSD Doppelmayr Sector Drive que combina les dues tecnologies, amb un motor síncron d'imants permanents i un reductor de dues etapes de tipus planetari.

Els dos sistemes d'accionament directe (DDD i LeitDrive) són pràcticament idèntics.

El principal element d'aquest sistema és un motor síncron d'imants permanents capaç de produir un gran parell a baixes revolucions.

Aquest motor es caracteritzen per tenir un gran diàmetre i un gran nombre de pols, entre 12 i 18. El rotor està format per imants permanents capaços de generar un gran camp magnètic. Altrament, els bobinats estan sectoritzats normalment en 8 sectors, permeten operar la instal·lació tot i que un d'aquests sectors fallí.

La refrigeració dels motors s'adequa en funció el parell i la velocitat a la qual han d'operar i es pot optar per una refrigeració per aire mitjançant ventiladors o bé per aigua. [6]

En l'actualitat s'han instal·lat sistemes de motors que van des d'una potència de 250 kW fins als 3 MW.

Aquest tipus de sistema motor com s'ha comentat anteriorment s'utilitza actualment sols en instal·lacions de gran envergadura, telecadires, telecabines o telefèrics i quan aquests no han de superar un gran desnivell. El sistema DSD s'usa en instal·lacions en què el desnivell és considerable, més de 800 m.

Així doncs, l'ús en teleesquís encara no s'ha produït.

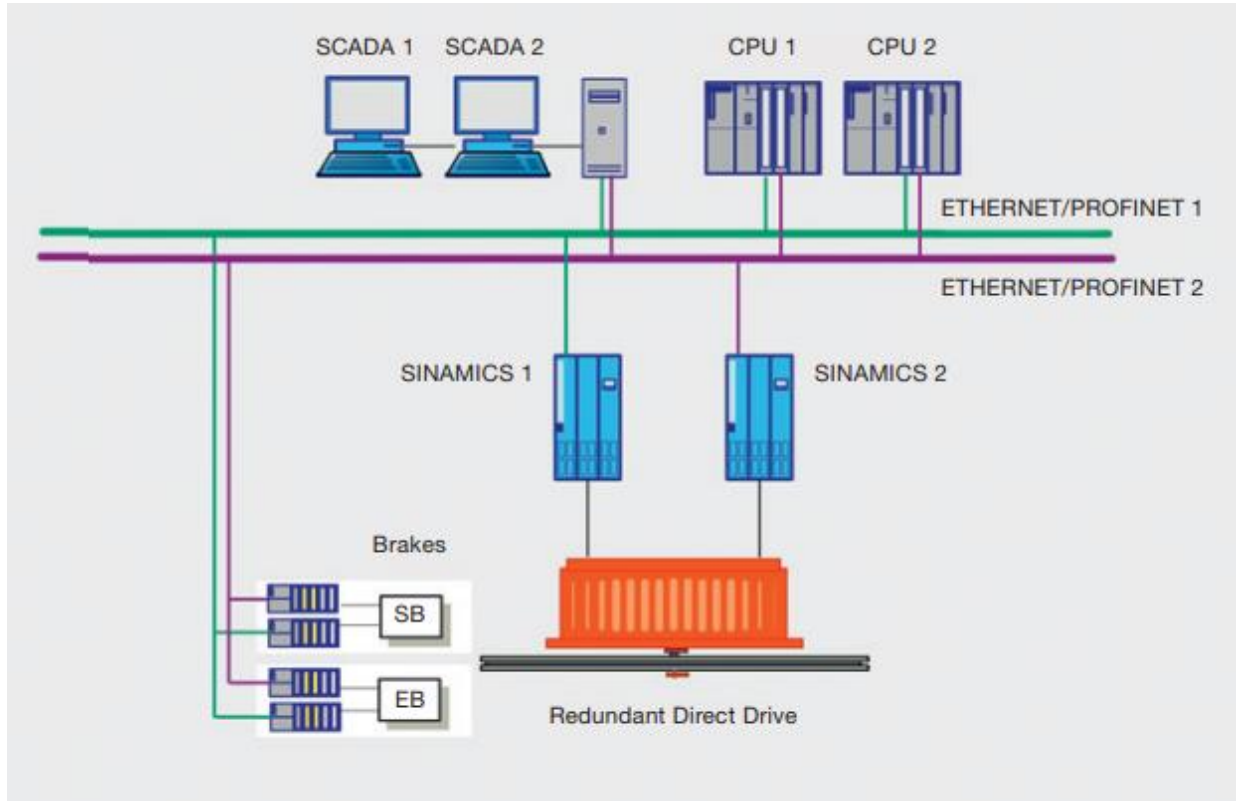


Figura 12 Esquema del sistema de control de l'accionament "Direct Drive". [6]

9. Normativa

Pel que fa a la normativa que aplica aquest tipus de remuntadors, en l'àmbit nacional destaca el plec de condicions tècniques per a la construcció i explotació de les instal·lacions de remunta-pendents aprovada per l'ordre del 25 d'octubre de 1976 del Ministeri d'obres públiques.

Pel que fa al dimensionat del sistema motor es destaquen els següents punts:

- La potència del motor es calcularà de manera que quedi assegurat l'arrencada de la instal·lació i el funcionament a règim normal, estant totalment carregat el ramal ascendent.
- La instal·lació elèctrica s'ajustarà al que disposa el Reglament Elèctric de baixa tensió vigent. En particular, existirà un dispositiu accionat pel circuit de seguretat que tallarà automàticament el corrent del motor quan es produeixi alguna anormalitat en aquest circuit.
- La instal·lació motora estarà dotada, bé amb un fre capaç d'impedir que la instal·lació inverteixi la seva marxa, actuant automàticament quan el motor es desconnecta o bé d'un dispositiu mecànic d'irreversibilitat. Aquest dispositiu no serà obligatori a les instal·lacions que, fins i tot en el cas de trencament d'un element de la transmissió, ofereixin una resistència al moviment que pugui garantir una desacceleració suficient, fins i tot en les condicions més desfavorables de càrrega.
- Existiran dispositius de seguretat que provocaran la parada automàtica de la instal·lació en els casos següents:
 - a) Descarrilament del cable tractor.
 - b) L'esquiador no es pot desenganxar de la perxa a l'estació d'arribada.
 - c) En iniciar-se el descens la recuperació de l'element extensible no es produeix completament, amb perill de provocar enganxades posteriors.
- Hi haurà polsadors manuals de parada a les estacions i a les pilones, excepte en els casos en què el traçat de la línia no ho aconselli. El dispositiu de seguretat ha d'estar proveït de les seyalitzacions necessàries per al seu correcte funcionament
- Totes les parts metàl·liques de la instal·lació, fins i tot el cable, que no hagin d'estar aïllats per la seva funció específica, estaran degudament posades a terra.
- Es suposarà un massa per usuari de **80 kg** i un coeficient esquí/neu del **0,06** com a mínim.
- La velocitat màxima normal no serà superior a **3,75 m/s**. Per a casos especials i sols per a instal·lacions que proporcionin accés a pistes de difícil descens, es podrà sol·licitar una velocitat superior, sempre que es puguin garantir les perfectes condicions de conservació de la pista. Aquesta excepció és aplicable a aquest projecte, i es pot considerar en moments d'aflluència punta, em dies festius.

Pel que fa a les acceleracions del remuntador el plec de condicions no especifica cap valor, no obstant per la resta d'instal·lacions de transport per cable sí que s'especifica un valor màxim de $\pm 1,5 \text{ m/s}^2$. Per aquest estudi es prendrà com a límit aquest rang.

10. Estimació dels requeriments de parell i potencia

Inicialment, es llistaran tots aquells elements que estiguin en moviment, recopilant les masses, així com, les inèrcies en cas que realitzin un moviment circular.

Es distingirà, doncs, entre dos elements, aquelles que facin un moviment circular i aquells que facin un moviment lineal.

Altrament, per als elements que facin un moviment lineal, es farà una altra distinció, entre aquells que no estan en contacte amb la capa de neu, s'anomenaran flotants, el cable i les perxes i aquells que si ho estan, els usuaris.

L'objectiu és desglossar el càlcul del parell total, en funció del parell necessari per accelerar i mantenir en moviment continu els diferents elements, durant l'operació de la instal·lació.

El croquis de forces i moment utilitzat per avaluar aquest, cas és:

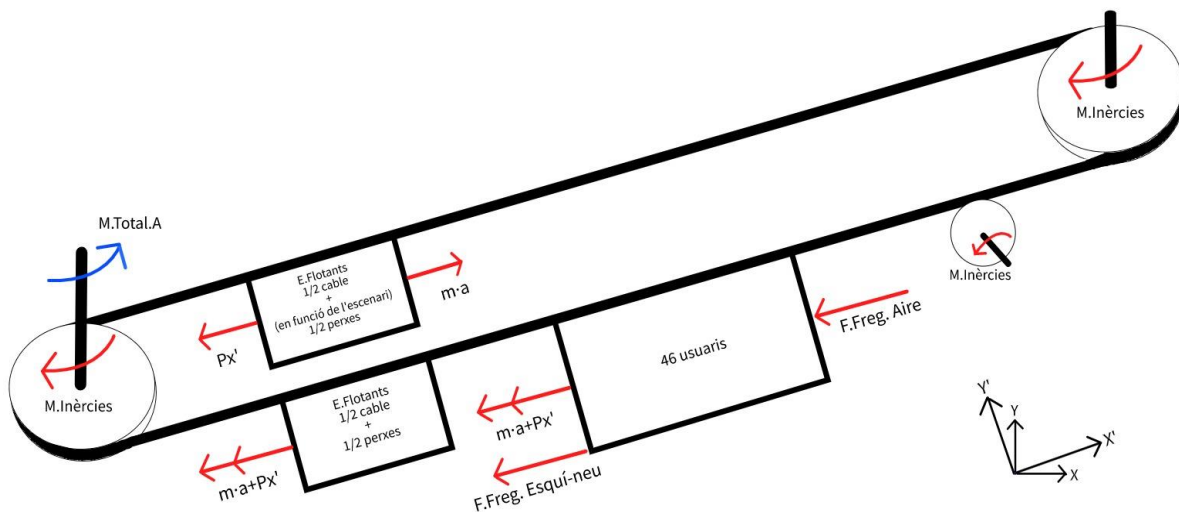


Figura 13 Croquis de forces i moments en el remuntador.

Les simplificacions i hipòtesis preses són:

- La línia del remuntador es considera que és totalment rectilínia amb un pendent mitjà del 34% (18,78°).
- La massa del cable i les perxes s'agrupa en una massa puntual a banda i banda de la instal·lació. Així doncs, en el croquis mostrat es considera que la massa del cable és nul·la.
- Pel que fa als fregaments mecànics es considera el fregament en els coixinets de les politges, i del cable amb els elements de suport i guiatge.
- La politja en la línia ascendent representa totes les politges de línia de la instal·lació, ascendents i descendents.
- Es considera que la línia ascendent està totalment carregada amb 46 usuaris, representats també com una massa puntual.
- L'efecte de la pressió dinàmica de l'aire sols es té en compte en els usuaris.

Aplicant els principis i fonaments de la dinàmica del sòlid rígid:

$$M_{Motor} - \sum_{i=0}^n M_{FREG} = \sum_{i=0}^n I_i \cdot \alpha_i + \sum_{i=0}^n M_{ACCEL}$$

$$M_{Motor} = \sum_{i=0}^n (R_{motriu} \cdot \sum_{i=0}^n T_i) + \sum_{i=0}^n I_i \cdot \alpha_i + \sum_{i=0}^n [R_{motriu} \cdot \sum_{i=0}^n (m_i \cdot a)]$$

Si separem i anomenem cada un dels termes del sumatori s'obté la següent expressió:

$$M_{Motor} = M_{Inèrcia+Freg} + M_{E.Flotalts+Freg} + M_{Usuaris} + M_{Aire}$$

On:

M_{Motor}: Moment generat per el sistema motor

M_{Inèrcia+Freg}: Moment necessari per accelerar els components rotatius

Per als elements rotatius s'aplicarà:

$$\sum_{i=0}^n M_i = I \cdot \alpha$$

En aquets cas es reescriu l'equació com:

$$M_{Inèrcia} = \sum_{i=0}^n I_i \cdot \alpha_i$$

En aquest punt es té en consideració totes les politges de la instal·lació, que sumen un total de 25.

El moment de fregament és considera que és un 25 % del moment inercial.

$$M_{Inèrcia+Freg} = 1,25 \cdot M_{Inèrcia}$$

M_{E.Flotalts+Freg}: Moment d'equilibri i d'acceleració lineal dels elements flotants (cable i perxes)

S'aplicarà la següent expressió:

$$\sum_{i=0}^n F_i = m \cdot a$$

A partir de la qual es calcularà la tensió necessària en el cable transportador, per accelerar i mantenir en moviment els elements flotants. El moment de fregament és considera que és un 25 % del moment d'acceleració lineal.

$$T_{E.Flotalts} = \sum_{i=0}^n F_i + 1,25 \cdot \sum_{i=0}^n m_i \cdot a$$

A partir d'aquesta tensió es calcularà el moment necessari com:

$$M_{E.Flotalts+Freg} = T_{E.Flotalts} \cdot R_{Motriu}$$

M_{Usuaris} : **Moment necessari per accelerar els usuaris de la línia i vèncer la força de fregament estàtic/dinàmic esquí-neu.**

El procediment de càlcul en termes genèrics és igual al dels elements flotants. Destacar, que en aquest cas s'haurà de tenir en compte la força de fregament de l'equí amb la capa de neu.

M_{Aire} : **Moment a causa de la força de fregament amb el aire dels usuaris**

Per calcular aquest moment s'utilitzarà l'expressió de la pressió dinàmica de l'aire, i es considerarà que actua únicament en els usuaris.

10.1 Descripció i quantificació dels elements

Moviment circular

En aquest apartat es recull tota la informació disponibles de les politges de l'estació motriu i de retorn, així com, les de línia.

Per poder calcular el moment d'inèrcia associat aquests elements s'ha d'especificar l'acceleració angular, aquest càlcul el realitzarem a partir de l'acceleració lineal de la instal·lació, que triga aproximadament 27 segons assolir la velocitat de consigna de 3,5 m/s. Per tant, l'acceleració lineal és de 0,13 m/s². A partir d'aquest valor es pot calcular l'acceleració angular de totes politges utilitzant la següent expressió:

$$\alpha = \frac{a}{r} \quad \left[\frac{rad}{s^2} \right]$$

D'altra banda, el parell necessari per accelerar aquest component serà de:

$$M_I = I \cdot \alpha \quad [N \cdot m]$$

Posteriorment, s'aplicarà un factor corrector per quantificar les pèrdues de fregament.

Per aquelles politges de les quals no es disposa de la inèrcia aquesta es calcula utilitzant la següent expressió:

$$I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \quad [kg \cdot m^2]$$

Se suposa que és un disc sòlid, ja que no es té informació detallada de la geometria d'aquests elements.

D'altra banda, les abreviacions utilitzades són:

- Com. Compressió. Cable per sota l'eix.
- Sup. Suport. Cable per sobre l'eix.
- Asc. Ascendent. Tram de línia ascendent.
- Desc. Descendent. Tram de línia descendent.
- X.Sup. o Com. El valor "X" és el número de pirona. Estan numerades de forma ascendent.

Taula 2 Moments inercials estació inferior

Estació inferior T80					
Tipus	Diàmetre (m)	Massa (kg)	Inèrcia (kg·m ²)	α (s ⁻²)	M _I (N·m)
Com. Asc.	1,55	120*	36,05	0,17	6,03
Com. Desc.	1,55	120*	36,05	0,17	6,03
Motriu	1,65	(...)	40,32	0,16	6,34

*Els valors amb asterisc, indica que és un valor estimat, a partir de la similitud amb altres elements dels quals sí que es disposa informació.

El sumatori dels moments inercials de l'estació motriu **18,4 N·m**.

Taula 3 Moments inercials estació superior

Estació Superior LSP PT					
Tipus	Diàmetre (m)	Massa (kg)	Inèrcia (kg·m ²)	α (s ⁻²)	M _I (N·m)
Retorn	3,50	(...)	519,78	0,07	38,50

El sumatori dels moments inercials de l'estació de superior **38,5 N·m**.

Taula 3 Moments inercials línia ascendent

Tram de línia ascendent					
Tipus	Diàmetre (m)	Massa (kg)	Inèrcia (kg·m ²)	α (s ⁻²)	M _I (N·m)
9.Sup.	1,05	56,5*	7,79	0,25	1,92
8.Sup.	1,05	56,5*	7,79	0,25	1,92
7.Sup.	1,00	52,8*	6,60	0,26	1,71
7.Com.	0,85	48,4*	4,37	0,31	1,33
6.Sup.	1,00	52,8*	6,60	0,26	1,71
6.Com.	0,85	48,4*	4,37	0,31	1,33
5.Com.	1,05	56,5*	7,79	0,25	1,92
4.Sup.	1,05	56,5*	7,79	0,25	1,92
3.Sup.	1,50	120,0*	33,76	0,17	5,84
2.Sup.	1,00	52,8*	6,60	0,26	1,71
2.Com.	0,85	48,4*	4,37	0,31	1,33
1.Com.	1,05	56,5*	7,79	0,25	1,92

*Els valors amb asterisc, indica que és un valor estimat, a partir de la similitud amb altres elements dels quals sí que es disposa informació.

El sumatori dels moments inercials del tram de línia accedent és de **24,6 N·m**.

Taula 4 Moments inercials línia descendent

Tram de línia descendent					
Tipus	Diàmetre (m)	Massa (kg)	Inèrcia (kg·m ²)	α (s ⁻²)	M _I (N·m)
9.Sup.	1,50	120,0*	33,76	0,17	5,84
8.Sup.	1,05	56,5*	7,79	0,25	1,92
7.Sup.	1,00	52,8*	6,60	0,26	1,71
7.Com.	0,85	48,4*	4,37	0,31	1,33
6.Sup.	1,00	52,8*	6,60	0,26	1,71
6.Com.	0,85	48,4*	4,37	0,31	1,33
5.Com.	1,05	56,5*	7,79	0,25	1,92
4.Sup.	1,05	56,5*	7,79	0,25	1,92
3.Sup.	1,50	120,0*	33,76	0,17	5,84

*Els valors amb asterisc, indica que és un valor estimat, a partir de la similitud amb altres elements dels quals sí que es disposa informació.

El sumatori dels moments inercials del tram de línia descendent és de **23,5 N·m**.

Cal destacar que la línia descendent sols compta amb la càrrega del mateix cable i les perxes i que aquesta no ha de mantenir una distància constant amb el terreny, és per aquest motiu que no compta amb politges de guiatge a les pilones 1 i 2.

Sumant tots els moments d'inèrcia de la línia i estacions s'obté un valor de:

$$M_{Inèrcia} = 18,4 + 38,5 + 24,6 + 23,5 = 105 Nm$$

S'aplica un factor d'1,25 per tenir en compte els fregaments en coixinets:

$$M_{Inèrcia+Freg} = K * M_{Inèrcia} = 131 Nm$$

Moviment rectilini

En aquest apartat es recull tota la informació disponibles del cable transportador, els vehicles i els usuaris.

Taula 5 Elements de moviment rectilini

Elements moviment rectilini			
Tipus	Unitats	Densitat	Massa
Cable	1.330 m	1,11 kg/m	1.476 kg
Perxes	93 un	12 kg/un	1.116 kg
Usuaris	46 us	80 kg/us	3.680 kg

Per al càlcul de la longitud del cable s'utilitza la següent expressió:

$$Long. cable = 2 * 659,6 + 0,5 * \pi * 3,5 + 0,5 * \pi * 1,65 = 1.327,3 m \approx \mathbf{1.330 m}$$

10.2 Càlcul del parell i la potència màxima

Es plantegen dos escenaris d'estudi, per determinar el parell i potència màxima de la instal·lació:

En el següent gràfic es representa la rampa d'acceleració de la instal·lació, així com els dos escenaris d'estudi. Escenari A just en iniciar la rampa d'acceleració i escenari B just en finalitzar la mateixa.

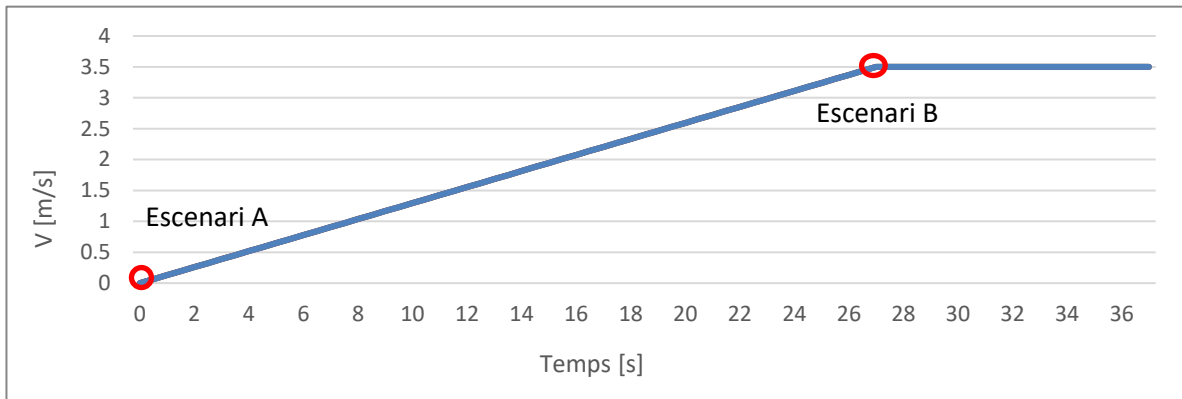


Figura 14. Rampa d'acceleració de la instal·lació

Els dos escenaris plantejats representen les condicions més desfavorables possibles.

Escenari A

- Arrencada de la instal·lació. Instant inicial, velocitat de 0 m/s.
- Línia ascendent totalment carregada amb 46 usuaris amb una massa unitària de 80 kg.
- Línia descendent sense cap perxa totalment descarregada.
- Vent frontal amb una velocitat de 15 m/s (54 km/h).

Escenari B

- Instal·lació en rampa d'acceleració, a un instant de temps d'assolir la velocitat màxima.
- Línia ascendent totalment carregada amb 46 usuaris amb una massa unitària de 80 kg.
- Línia descendent sense cap perxa totalment descarregada.
- Vent frontal a una velocitat de 15 m/s (54 km/h).

Simplificacions preses

- Es suposa un perfil de la línia rectilini, amb un pendent del 34%.
- El perfil de velocitat del vent és constant amb una direcció paral·lela al perfil del traçat i perpendicular, per tant, a la superfície projectada de l'usuari. Amb un sentit oposat al sentit de moviment de l'usuari.
- Tots els usuaris de la línia rebran la mateixa força de fregament degut a l'aire.
- Es menysprea el fregament amb l'aire dels vehicles.
- Es considera que la distància entre cable i la pista de neu és constant.
- S'estima que durant tot el trajecte un 60% del pes de l'usuari és suportat pel remuntador

A continuació és mostra un croquis on es representa un usuari en la línia ascendent del remuntador, i les principals forces que actuaran sobre aquest i la línia.

L'esforç vertical Y' , transmès al cable, serà absorbit pels suports, l'esforç paral·lel al traçat X' , és la força que s'haurà de transmetre al cable mitjançant el moment produït pel sistema motor.

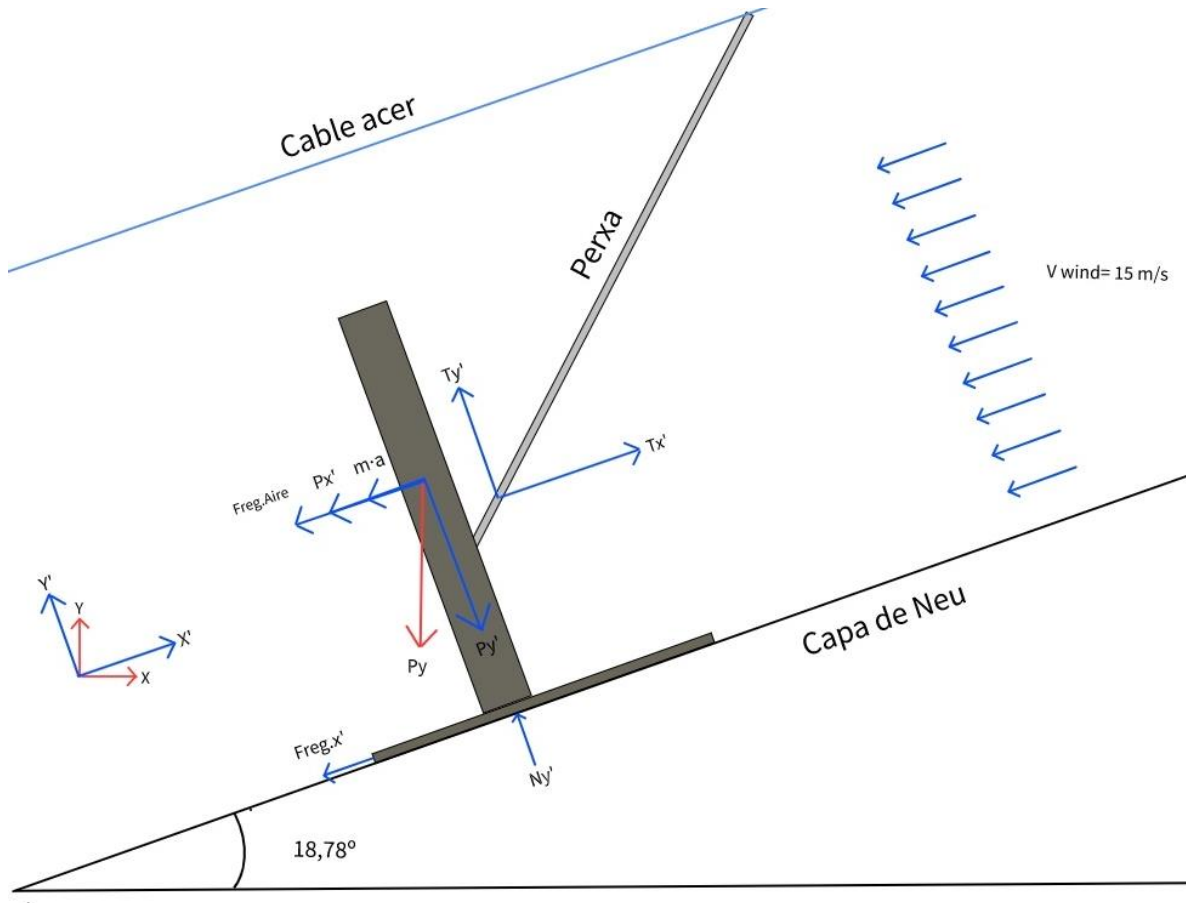


Figura 15. Croquis de forces

Per al càlcul del moment total, com s'ha esmentat anteriorment, s'utilitzarà la següent expressió:

$$M_{Motor} = M_{Total} = M_{Inèrcia+Freg} + M_{E.Flotsants+Freg} + M_{Usuaris} + M_{Aire}$$

Escenari A

0A. $M_{Inèrcia}$: Moment necessari per accelerar els components rotatius:

$$M_{Inèrcia} = 131,3 \text{ Nm}$$

1A. $M_{E.Flòtants}$: Moment necessari per accelerar linealment els elements flotants

A continuació, es calcula la força necessària per accelerar linealment els elements "flotants" és a dir, que no estan en contacte amb la pista de neu. El cable tractor i els vehicles.

S'anomena també parrell de buit, sense cap usuari a la línia, comptabilitzant les 46 perxes en el ramal ascendent i el cable tractor.

Inicialment calcularem el parrell d'equilibri:

Com es pot observar en la Figura 12, l'eix de coordenades XY està orientat respecte l'horitzontal en el cas de la X i el nivell o plomada en el cas de la Y. L'eix auxiliar X'Y' està orientat amb el perfil del traçat.

Així doncs s'obté:

$$m_{perxes} = 12 * 46 = 552 \text{ kg} \quad P_{perxes.Y} = 552 * 9,81 = 5.415 \text{ N}$$

$$P_{Perxes.X'} = P_{perxes.Y} * \sin(18,78^\circ) = 1.743,3$$

$$M_{Equilibri} = P_{Perxes.X'} * R_{motriu} = 1.438 \text{ Nm}$$

Aquest és el moment que hauria de produir el motor o el fre antiretrocsés per evitar que la instal·lació un cop parada invertís la marxa. Quan la instal·lació està en buit.

Parrell d'acceleració lineal dels elements "flotants":

$$m_{flòtants} = m_{perxes} + m_{cable} = 2.034 \text{ kg} \quad a = 0,13 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{aX'} = m_{flòtants} * a = 263,7 \text{ N}$$

Apliquem un factor de correcció d'1,25 per comptabilitzar el fregament del cable amb els diferents elements de guiatge i suport.

$$F_{f_{aX'}+F_{reg}} = 1,25 * F_{aX'} = 329,6 \text{ N}$$

$$M_{Acce.Lineal+Freg} = F_{f_{aX'}+F_{reg}} * R_{motriu} = 272 \text{ Nm}$$

El parell total necessari per a l'acceleració dels elements flotants serà de:

$$M_{E.flòtants+Freg} = M_{Equilibri} + M_{Acce.Lineal+Freg} = 1.710,2 \text{ Nm}$$

2A. M_{Usuaris} : Moment necessari per accelerar els usuaris de la línia i vèncer la força de fregament estàtic esquí-neu.

$$m_{\text{Usuaris}} = 46 * 80 = 3.680 \text{ kg} \quad P_{\text{Usuaris.Y}} = 552 * 9,81 = 36.101 \text{ N}$$

$$P_{\text{Usuaris.X}'} = P_{\text{Usuaris.Y}} * \sin(18,78^\circ) = 11.622 \text{ N}$$

Si s'estima que un 60% del pes de l'usuari és suportat pel remuntador la normal amb el terreny serà:

$$P_{\text{Usuaris.Y}'} = P_{\text{Usuaris.Y}} * \cos(18,78^\circ) = 34.179 \text{ N}$$

Per tant, la força de fregament estàtic, amb un coeficient esquí-neu de $\mu_e = 0,1$, serà de: [8]

$$N_{\text{Usuaris.Y}'} = 0,4 * P_{\text{Usuaris.Y}'} = 13.672 \text{ N}$$

$$F_{\text{Freg.X}'} = 0,1 * N_{\text{Usuaris.Y}'} = 1.367 \text{ N}$$

$$T_{\text{X}'} = P_{\text{Usuaris.X}'} + F_{\text{Freg.X}'} + m_{\text{Usuaris}} * a$$

$$T_{\text{X}'} = 11.622 + 1.367 + 3.680 * 0,13 = 13.466 \text{ N}$$

Així doncs, el moment necessari és:

$$M_{\text{Usuaris}} = T_{\text{X}'} * R_{\text{motriu}} = \mathbf{11.110 \text{ Nm}}$$

3A. M_{Aire} : Moment a causa de la força de fregament amb el aire dels usuaris

Inicialment, es calcularà la densitat de l'aire en les condicions meteorològiques i d'altitud de l'entorn del remuntador.

Equacions del model estàndard de l'atmosfera, per al nivell de la troposfera (fins a 9 km):

$$T = 15,04 - 0,00649 * H = -2,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Sent H l'altura mitjana el traçat: $H = \frac{2.540+2.748}{2} = 2.644 \text{ m}$

$$P = 101,29 * \left[\frac{T + 273,15}{288,08} \right]^{5,256} = 72,2 \text{ kPa}$$

$$R = 287,057 \text{ J/kgK}$$

$$\rho = \frac{P}{R * (T + 273,15)} = 0,93 \text{ Kg/m}^3$$

D'altra banda, es considerarà que la instal·lació no s'operarà quan la velocitat del vent sigui superior als 15 m/s.

Per als càlculs que es presenten a continuació, es considera que el vent té la direcció de la línia, actuant frontalment contra els usuaris del remuntador amb una velocitat efectiva de 18,5 m/s (66,6 km/h), quan la instal·lació opera a velocitat nominal.

El remuntador pel que fa a les limitacions estructurals podria operar amb velocitats superiors, això no obstant, en aquestes condicions el confort dels usuaris es redueix considerablement, ja que han de suportar una sensació tèrmica de $-22,7 \text{ }^\circ\text{C}$ durant els 3 minuts i 6 segons que durà el trajecte,

quan la temperatura és de $-2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, una temperatura que en realitat és força suau per la climatologia de l'entorn.

Utilitzant la fórmula de Siple:

$$T_{\text{aparent}} = 33 + (T_{\text{aire}} - 33) * (0,474 + 0,454 * \sqrt{v} - 0,0454 * v)$$

$$T_{\text{aparent}} = 33 + (-2.1 - 33) * (0,474 + 0,454 * \sqrt{18,5} - 0,0454 * 18,5) = -22,7\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Per al càlcul de la pressió dinàmica de l'aire s'utilitza la següent expressió: [4]

$$P = \frac{1}{2} * \rho * v^2 = \frac{1}{2} * 0,93 * 15^2 = 104,425\text{ Pa}$$

Es considera que la superfície frontal d'un usuari és de $0,7\text{ m}^2$ i el coeficient aerodinàmic de 1,1.

Així doncs, la força de fregament amb l'aire serà de:

$$F_{\text{aire}} = C_X * P * S = 1,1 * 104,4 * (0,7 * 46) = 3.699\text{ N}$$

I un moment per tan de: $M_{\text{Aire}} = F_{\text{aire}} * R_{\text{motriu}} = 3.051\text{ Nm}$

4A. M_{Motor} : Parell del motor

A continuació es calcula el parell màxim d'arrencada. També s'avalua en tant per cent on es destina aquest parell.

Taula 6 Parell total escenari A

Descripció	Símbol	Valor (Nm)	En (%)
Moment inercial	$M_{\text{Inèrcia+Freg}}$	131,3	0,9
Moment d'acceleració i fregament de les masses flotants	$M_{\text{E.Flotalants+Freg}}$	1710	10,7
Moment d'acceleració dels usuaris partint d'una velocitat nul·la. Fregament estàtic.	M_{Usuaris}	11.110	69,4
Moment de fregament amb l'aire	M_{Aire}	3.051	19
Moment del motor	M_{Motor}	16.003	100

El moment d'arrencada total és de:

$$M_{\text{Motor}} = M_{\text{Inèrcia+Freg}} + M_{\text{E.Flotalants+Freg}} + M_{\text{Usuaris}} + M_{\text{Aire}} =$$

$$131,3 + 1.710 + 11.110 + 3.051 = \mathbf{16.003\text{ Nm}}$$

Escenari B

0B. $M_{Inèrcia}$: Moment necessari per accelerar els components rotatius:

$$M_{Inèrcia+Freq} = 131,3 \text{ Nm}$$

1B. $M_{E.Flotalants}$: Moment necessari per accelerar linealment els elements flotants

El valor d'aquest moment serà el mateix que en els escenari A.

$$M_{E.flotalants+Freq} = 1.710,2 \text{ Nm}$$

2B. $M_{Usuaris}$: Moment necessari per accelerar els usuaris de la línia i vèncer la força de fregament dinàmic esquí-neu.

$$m_{Usuaris} = 46 * 80 = 3.680 \text{ kg} \quad P_{Usuaris.Y} = 552 * 9,81 = 36.101 \text{ N}$$

$$P_{Usuaris.X'} = P_{Usuaris.Y} * \sin(18,78^\circ) = 11.622 \text{ N}$$

Si s'estima que un 60% del pes de l'usuari és suportat pel remuntador la normal amb el terreny serà:

$$P_{Usuaris.Y'} = P_{Usuaris.Y} * \cos(18,78^\circ) = 34.179 \text{ N}$$

Per tant, tal força de fregament dinàmica amb un coeficient esquí neu de $\mu_d = 0,06$, serà de:

$$N_{Usuaris.Y'} = 0,4 * P_{Usuaris.Y'} = 13.672 \text{ N}$$

$$F_{Freq.X'} = 0,06 * N_{Usuaris.Y'} = 820 \text{ N}$$

$$T_{X'} = P_{Usuaris..X'} + F_{Freq.X'} + m_{Usuaris} \cdot a$$

$$T_{X'} = 11.622 + 820 + 3.680 \cdot 0,13 = 12.919 \text{ N}$$

Així doncs, el moment necessari és de:

$$M_{Usuaris} = T_{X'} * R_{motriu} = 10.658 \text{ Nm}$$

3B. M_{Aire} : Moment degut a la força de fregament amb el aire dels usuaris

Càlcul de la densitat de l'aire en les condicions meteorològiques i d'altitud de l'entorn del remuntador.

S'usen els valors calculats per escenari A.

$$\rho = 0,93 \text{ Kg/m}^3$$

Es considerarà que la instal·lació no s'operarà quan la velocitat del vent sigui superior als 15 m/s.

Per al càlcul de la pressió dinàmica de l'aire s'utilitza la següent expressió: Considerant l'instant just abans d'assolir la velocitat màxima de 3,5 m/s. Per tant, la velocitat del vent que experimentarà l'usuari serà de:

$$v = 3,5 + 15 = 18,5 \text{ m/s}$$

$$P = \frac{1}{2} * \rho * v^2 = \frac{1}{2} * 0,93 * 18,5^2 = 158,843 \text{ Pa}$$

Així doncs, la força de fregament amb l'aire serà de:

$$F_{aire} = C_X * P * S = 1,1 * 158,8 * (0,7 * 46) = 5.626 N$$

I el moment de: $M_{Aire} = F_{aire} * R_{motriu} = 4.642 Nm$

4B. M_{Motor} : Parell del motor

A continuació es calcula el parell màxim d'arrencada i també s'avalua en tant per cent on es destina aquest parell. Tot comparant-ho amb l'escenari A.

Taula 7 Parell total escenari B

Descripció	Símbol	Escenari A		Escenari B	
		Valor (Nm)	En (%)	Valor (Nm)	En (%)
Moment inercial	$M_{Inèrcia+Freg}$	131,3	0,9	131,3	0,77
Moment d'acceleració i fregament de les masses flotants	$M_{E.Flotalants+Freg}$	1.710	10,7	1.710	9,97
Moment d'acceleració dels usuaris partint d'una velocitat nul·la. Fregament estàtic.	$M_{Usuaris}$	11.110	69,4	10.648	62,12
Moment de fregament amb l'aire	M_{Aire}	3.051	19	4.642	27,08
Moment motor	M_{Motor}	16.003	100	17.142	100

El parell màxim d'acceleració és de:

$$M_{Motor} = M_{Inèrcia+Freg} + M_{E.Flotalants+Freg} + M_{Usuaris} + M_{Aire} =$$

$$131,3 + 1.710 + 10.648 + 10.648 = 17.142 Nm$$

10.3 Resum de resultats i comprovació de valors

L'escenari més desfavorable és el B, el parell màxim és de 17.142 Nm.

Amb aquestes condicions la potència necessària a la politja motriu ha de ser de:

$$P_{Total} = w \cdot M_{TotalB} = \frac{3,5}{0,5 * 1,65} * 17.142 = 72.722 \text{ W}$$

En el cas l'accionament directe, aquests valors hauran de ser el parell i potència a l'eix de sortida del motor, ja que no compta amb caixa reductora.

Les potències normalitzades dels motors d'inducció, com el motor actual, properes aquest valor són de 75 kW i 80 kW. Si s'elegeix just la potencia normalitzada immediatament superior, 75 kW, és precisament la potència del motor actual.

D'altra banda pel que fa al parell màxim necessari s'estima que serà de 17,2 kNm inferiors als 19,3 kNm del sistema reductor actual.

Aquesta comparació de resultats, permet determinar la validesa del càlcul del parell i potència del remuntador, tot i les simplificacions preses.

10.4 Corbes de parell i potència en diferents escenaris de funcionament

A continuació, es mostra la corba parell potencia necessàries per accelerar la instal·lació fins la velocitat nominal de 3,5 m/s en un temps de 27 segons. Amb una velocitat del vent 15 m/s.

Es destaquen els següents punts:

- Quan la instal·lació està aturada, el sistema de fre o antiretrocsés ha de ser capaç de generar o suportar un moment de 12,95 kNm, de no ser així la instal·lació començaria accelerar en sentit contrari per l'efecte de la gravetat.
- El parell d'arrencada és de 16 kNm.
- En els primers segons de la rampa d'acceleració el parell necessari disminueix, ja que els coeficients de fregament estàtics són majors als dinàmics.
- Tant la corba parell com la corba potència, durant la rampa d'acceleració, no tenen un pendent constant, aquest és creixent, a causa de l'efecte quadràtic en la velocitat per al càlcul de la pressió dinàmica del vent.
- El parell màxim necessari és de 17,2 kNm i la potència de 73 kW juts en l'instant anterior a assolir la velocitat nominal.
- En règim nominal el parell requerit és 16,34 kNm i una potència de 69,34 kW.

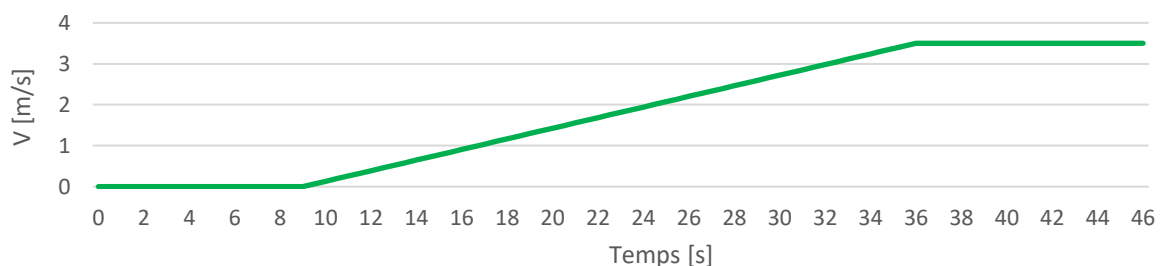


Figura 16 Velocitat remuntador durant la rampa d'acceleració

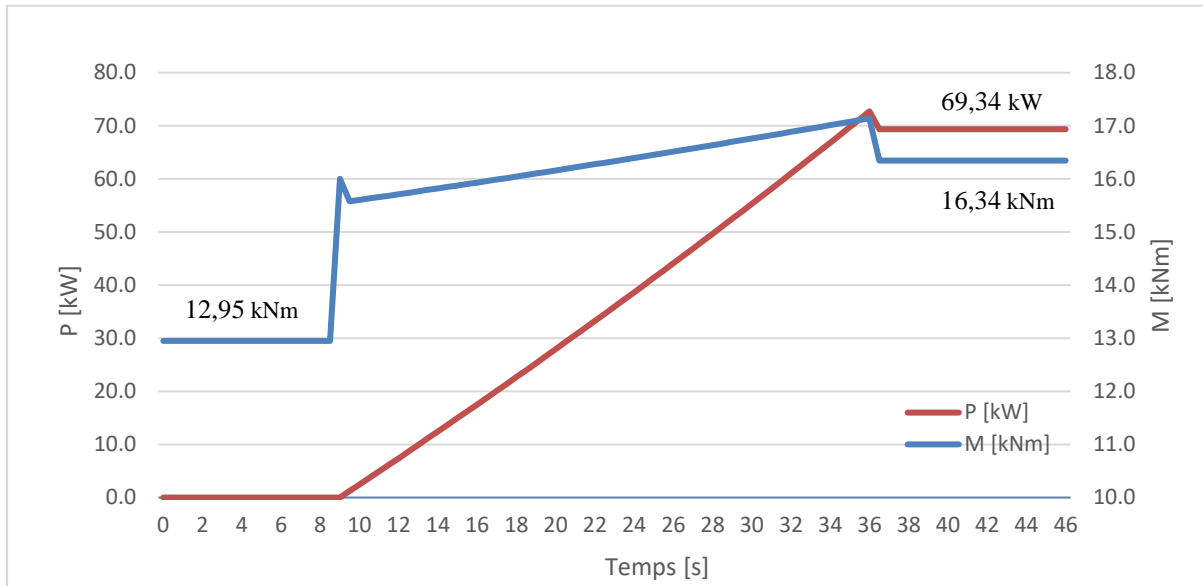


Figura 17 Corbes moment i potència en rampa d'acceleració (vent 15 m/s)

I finalment s'analitzarà un tercer escenari, l'escenari C, un escenari que representa les condicions d'operació més habituals del remuntador.

Escenari C

- Línia ascendent parcialment carregada al 70%, amb 32 usuaris amb una massa unitària de 80 kg.
- Línia descendent amb 32 perxes.
- La velocitat del vent té un component frontal de 4 m/s (14,4 km/h).

A continuació, es mostra la corba parrell-potència necessàries per accelerar la instal·lació fins la velocitat nominal de 3,5 m/s en un temps de 27 segons. Amb una velocitat del vent 4 m/s.

Es destaquen els següents punts:

- Moment necessari del sistema antiretròcés 6,14 kNm.
- El parrell d'arrencada és de 8,43 kNm.
- El parell màxim necessari és de 8,66 kNm i la potència de 36,7 kW juts en l' instant anterior a assolir la velocitat nominal.
- En règim nominal el parrell requerit és 7,95 kNm i una potència de 33,7 kW.

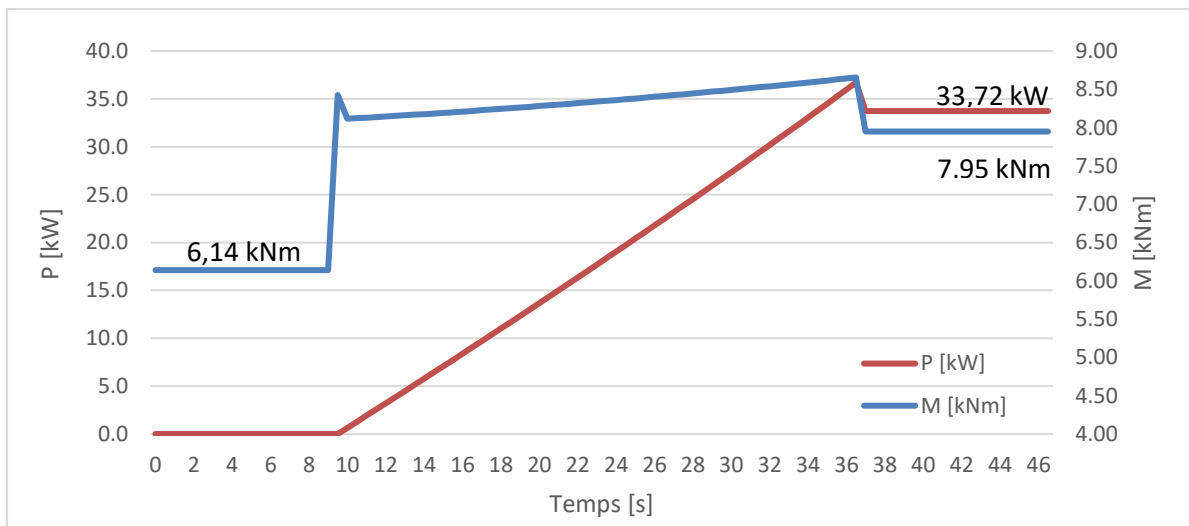


Figura 18 Corbes moment i potència en rampa d'acceleració (vent 4 m/s)

Per aquest escenari també s'ha analitzat la rampa de desacceleració. Que té una durada aproximada de 3,5 segons amb una acceleració, per tant, de -1 m/s^2 .

Es destaca el següent:

- Durant la rampa de desceleració el sistema motor ha d'aportar un moment positiu per suavitzar la desacceleració i assolir l'objectiu de -1 m/s^2 . De no ser així l'aturada seria massa brusca. Durant el període de desacceleració el motor aporta un moment que varia el llarg del temps entre 4,42 kNm i 3,88 kNm amb un valor mitjà de 4,15 kNm. El moment necessari decreix, a mesura que es redueix la velocitat de la instal·lació, ja que la força de fregament amb l'aire, és funció de la velocitat i es redueix amb aquesta.

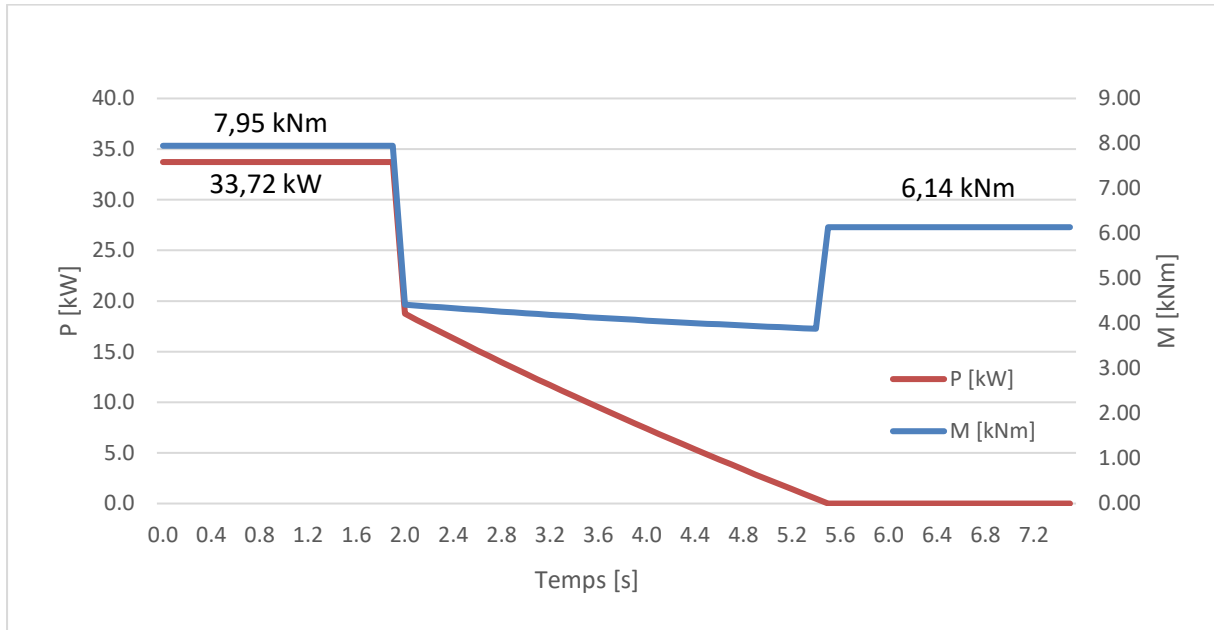


Figura 19 Corbes moment i potència en rampa d'acceleració (vent 4 m/s)

11. Estudi de les diferents màquines elèctriques rotatives

Inicialment, es classificaran els diferents motors elèctrics tot especificant els principals avantatges i desavantatges de cada tecnologia, en funció dels requeriments del cas d'estudi i la seva idoneïtat per ser implementats en un sistema de transmissió directa. [9];[10];[11]

11.1 Classificació dels motor elèctrics

Existeixen diferents classificacions, en funció per exemple de:

Quin element podreix el flux magnètic, un bobinat o bé imants permanents. En funció de si el rotor gira a la velocitat de sincronisme o no. O bé si la màquina disposa o d'escombretes o no.

La classificació que s'utilitzarà en aquest estudi és a partir del tipus de corrent utilitzat per la seva alimentació. Pot ser corrent continu, corrent altern (monofàsic i trifàsic) o bé corrent per polsant.

Aquesta darrera classificació no es desenvolupà posteriorment, ja que l'aplicació d'aquest en motors, coneguts normalment pel nom de servomotors, dista totalment de la d'estudi, s'usa en aplicacions en què el moviment no sol ser continu i es requereix molta precisió, com pot ser el cas d'un braç robòtic.

11.1.1 Corrent continu

Una de les principals característiques d'aquest tipus de màquina és que el rotor és alimentat per unes escombretes i un col·lector, que en girar commuta els corrents en el rotor produint un camp magnètic giratori.

També existeixen motors de corrent continu sense escombretes en el rotor, on hi ha una commutació electrònica sense contacte o bé imants permanents (BLDC). S'utilitza en aplicacions de molt baixa potència com ara lectors de DVD, ventiladors d'ordinador, etc.

L'estator de les màquines de corrent continu fa la funció d'inductor, els pols d'aquest estator són pols sortints i el flux magnètic és creat normalment per bobinats.



Figura 20 Màquina de corrent continu

Això no obstant, per a motors de baixa potència, normalment inferiors a 1 cv, també se solen utilitzar imants permanents.

D'alta, banda els motors de corrent continu es poden classificar en funció del tipus d'excitació:

- Excitació independent
És el més adequat per a la regulació. Tanmateix, requereix fonts de tensió independents.
- Excitació en sèrie
Si el motor compta amb aquest tipus d'excitació, disposa d'un gran parell d'arrencada. Tanmateix, en augmentar el parell requerit la velocitat disminueix.

En situacions de poca càrrega o operant en buit el motor accelera de forma no controlada assolint velocitats molt elevades "embalament" que poden comportar la destrucció d'aquest.

- Excitació en derivació (“shaunt”)

La principal característica és que la velocitat del motor és pràcticament constant independentment de la càrrega mecànica.
- Excitació composta (“compound”)

Presenta característiques intermèdies entre el motor sèrie i el de derivació

Els principals desavantatges d'aquesta tecnologia són:

- Constructivament parlant, són més complexes i, per tant, més cares, que les màquines de corrent altern.
- Requereix d'una font de corrent continu.
- La utilització d'escombretes i la necessitat d'un col·lector la fa una màquina menys robusta.
- El manteniment és superior, ja que les escombretes són un consumible que s'ha de reemplaçar, altrament la resistència del contacte entre escombreta col·lector amb el temps pot augmentar reduint l'eficiència del motor.
- La densitat de potència i parell d'aquestes màquines és menor comparada amb les màquines de corrent altern.
- L'eficiència en termes generals és menor. Un dels factors que contribueixen a disminuir aquesta eficiència, a part del fet d'utilitzar escombretes és el fenomen de la reacció en l'induït. El corrent que circula pels conductors del rotor crea un camp magnètic perpendicular que distorsiona el camp magnètic de l'inductor, enrederint la línia neutra. Aquest fet produeix la formació d'arcs en les escombretes que disminueix la vida útil d'aquestes i del col·lector.

Hi ha diferents solucions aquesta problemàtica, per una banda, l'avançament de les escombretes, antigament es feia manualment i s'havia d'ajustar per cada càrrega. Actualment, sols s'utilitza per motors de petita potència que treballaran en una càrrega constant i coneguda.

O bé la col·locació de pols auxiliar per anul·lar el camp magnètic generat pel rotor. Aquests generen un camp magnètic transversal i de sentit oposat al del rotor.

Això no obstant, també té avantatges:

- Permet un ampli rang de funcionament de velocitats.
- El control de velocitat és senzill i precís.
- En funció de la configuració de l'excitació són màquines amb grans parells d'arrencada. Que per l'aplicació d'estudi és una condició indispensable.
- Ofereixen la possibilitat d'operar com a fre regeneratiu.

Destacar, finalment que els primers teleesquís propulsats per energia elèctrica, primera meitat del segle XX, muntaven motors de corrent continu, ja que es podien controlar de forma senzilla i precisa amb la tecnologia disponible en aquella època.

11.1.2 Corrent altern

Els motors de corrent altern, es poden classificar en funció de si la velocitat mecànica de gir del rotor està o no en sincronisme amb la velocitat de gir del camp magnètic generat per l'estator.

Altrament, també es poden classificar en funció de si són trifàsics o monofàsics. Quan es requereixen potències o parells elevats, s'opera en un sistema trifàsic, ja que aquest sistema permet transportar amb tres conductors el triple de potència que el sistema monofàsic compost per dos conductors, altrament tenen un major rendiment i són més senzill i econòmics de construir.

En el cas d'estudi es requereix un alt parell, i una potència considerable, així doncs es detallarà l'estudi i classificació de les diferents topologies de motors trifàsics prescindint dels monofàsics. [9];[10];[11]

11.1.2.1 Motors asíncrons o d'inducció trifàsics

Els motors asíncrons o d'inducció es caracteritzen perquè el rotor no gira a la velocitat de sincronisme. Existeix una diferència entre la velocitat del camp magnètic giratori de l'estator i la velocitat mecànica de gir del rotor, aquesta diferència se sol quantificar en forma de percentatge i s'anomena lliscament o en anglès "slip". Amb valors en règim nominal d'entre 1% al 8%.

Aquest lliscament no és constant i dependrà de la càrrega a la qual estigui sotmès el motor, com més càrrega suporti el motor major lliscament. Quan el motor està en buit aquest lliscament s'aproxima a zero, en canvi, en el moment d'arrencar és màxim.

L'estator d'aquests motors està format per debanats connectats a les diferents fases per crear el camp magnètic giratori desitjat, normalment amb més d'un parell de pols.

Altrament, una de les principals característiques d'aquest motor d'inducció trifàsic és que disposen de parell d'arrencada en ser connectats directament a la xarxa.

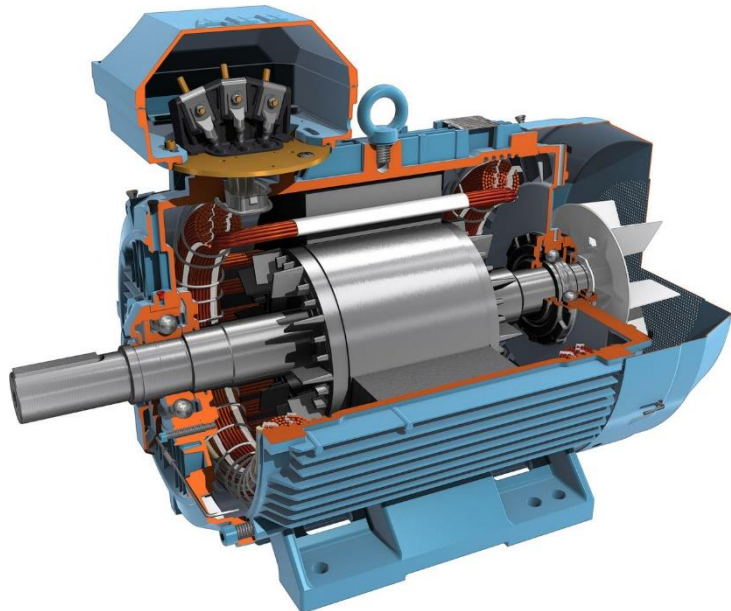


Figura 21 Motor d'inducció amb rotor curt-circuitat

En funció del tipus de debanat del rotor es pot distingir entre:

- **Rotor curt-circuitat o de gàbia d'esquirol.** El debanat està format per unes barres, normalment d'alumini, allotjades en les ranures del rotor que queden unides entre si en els extrems per anells de curtcircuit.
- **Rotor bobinat amb anells.** El rotor compta amb un debanat trifàsic convencional, les fases del qual es connecten a l'exterior mitjançant un col·lector llis de 3 anells amb les corresponents escombretes. Aquest tipus d'escombreta-col·lector requereix menor manteniment que en el cas de les màquines de contínua perquè el desgast és menor.

El propòsit inicial de l'existència del rotor bobinat, és la d'evitar els forts corrents en l'estator, durant l'arrencada del motor, inevitables quan és de "gàbia d'esquirol". En l'arrencada del motor el lliscament en el motor és màxim, del 100%, reduint la impedància equivalent del motor respecte la xarxa, maximitzant el corrent consumit.

Els motors de rotor bobinat, es connecten per a arrencar-los a resistències exteriors. Això limita els corrents en l'estator i a mesura que el motor accelera, es van reduint fins a deixar-les en curtcircuit, aconseguit el règim de velocitat nominal, el comportament en aquest punt és el mateix que el d'un motor de rotor curtcircuitat o "gàbia d'esquirol".

El motor de rotor bobinat no representa en l'actualitat cap avantatge respecte del de rotor curtcircuitat, ja que l'electrònica de potència aplicada als controls actuals, proporcionen regulació de velocitat i control molt precís dels corrents d'arrencada, i del parell motor.

Els principals desavantatges d'aquest tipus de motors són:

- Factor de potència de com a molt el 0,85, no regulable. Altrament, quan el motor opera en condicions de càrrega variables amb càrregues considerablement per sota del seu valor nominal, el factor de potència decreix considerablement.
- La densitat de parell i potència no és tan elevada com els motors síncrons. Sent màquines més voluminoses i pesades.

Els principals avantatges són:

- Construcció simple per naturalesa que contribueix a reduir el cost de fabricació.
- Motor molt robust que no requereixen pràcticament manteniment.
- No compta amb escombretes ni anells (gàbia d'esquirol)
- A plena càrrega té una bona eficiència.
- Molt utilitzats a la indústria.

11.1.2.2 Motors síncrons

Existeixen principalment dues tipologies de motors síncrons, per una banda, els motors síncrons amb rotor bobinat alimentat amb corrent continu i els d'imants permanents. [9];[10];[11]

1. Rotor bobinat i alimentat en DC

El principal tret característic d'aquests motors és que manquen de moment d'arrencada.

L'estator d'aquest tipus de màquina és igual al d'un motor asíncron, de fet fins al punt que poden ser intercanviables.

El rotor s'alimenta amb corrent continu per generar el camp magnètic.

El camp magnètic de l'estator arrossega el camp magnètic del rotor. La velocitat de gir del camp magnètic de l'estator respecte al rotor és nul·la, ja que gira en velocitat de sincronisme.

Els bobinats del rotor estan curtcircuitats, és a dir, és del tipus gàbia d'esquirol.

Si no es disposa de variador de freqüència, un dels mètodes per arrencar aquest tipus de motor és arrancar-lo com un motor asíncron, curtcircuitant els bobinats del rotor, en buit. Un cop ha assolit pràcticament la velocitat de sincronisme, s'aplica la tensió de corrent continu al rotor produint l'acoblament dels dos camps magnètics. En aquest moment es pot produir una vibració si just s'enfronten dos pols iguals produint repulsió. Una altre mètode podria ser la utilització en sèrie d'un petit motor d'inducció que acceleri el rotor en buit, fins a la velocitat de sincronisme.



Figura 22 Motor síncron amb rotor bobinat

L'existència d'aquest motor es justifica, ja que permeten ajustar la impedància d'aquest respecte la xarxa, mitjançant la tensió aplicada en l'excitació rotòrica. Si estan sobreexcitats es comporta com una càrrega capacitiva que ajuda a compensar el factor de potència inductiu de la indústria. D'altra banda, si estan subexcitats es comporten com una càrrega inductiva, el mateix tipus de càrrega que els motors asíncrons.

Quan s'aplica una càrrega aquests motors el rotor es desfasa uns graus respecte al camp giratori de l'estator. Aquest angle de desfasament depèn de la càrrega, a major càrrega major angle, en buit és pràcticament zero els pols del rotor estan gairebé perfectament alienats amb els pols de l'estator.

Quan hi ha variacions brusques de càrrega l'efecte de la gàbia d'esquirol ajuda a amortir aquestes variacions i mantenir una velocitat constant.

Quan els dos camps magnètics estan acoblats es deixa d'induir una tensió als bobinats del rotor, ja que en aquest moment els conductors de la gàbia d'esquirol no veuen un camp magnètic variable, pel fet que la velocitat relativa és zero. I desapareix el seu efecte en el motor.

Aquest tipus de màquina rotativa se sol utilitzar com a generador, pel fet que en la producció elèctrica és essencial controlar la velocitat de gir per obtenir senyals elèctrics amb una freqüència constant.

L'excitació d'aquests motors pot ser estàtica amb escombretes o bé dinàmica sense escombretes:

- Estàtica: Els motors estan equipats amb anells i escombretes que permeten l'alimentació dels pols del rotor a través de contactes lliscants.
- Sense escombretes: Els motors són equipats amb un excitador giratori, instal·lat normalment al part posterior del motor.

Els principals desavantatges d'aquest tipus de motors són:

- No disposen de parell d'arrencada, si no van acompanyats d'un variador de freqüència.
- Fabricació és més complex i costosa.

Els principals avantatges són:

- Permet assumir variacions de càrrega considerables mantenint una velocitat constant.
- Ofereixen la possibilitat d'operar com a fre regeneratiu.
- Es pot controlar el factor de potència de la màquina.
- Són màquines més eficients.
- Major densitat de parell i potencia que les màquines d'inducció, així doncs, són màquines més compactes.

2. Rotors d'imants permanents (PMSM)

Aquest tipus de motos inicialment s'utilitzaven per aplicacions del tipus servomotor on no es requerien grans potències.

No es plantejava el seu ús en aplicacions de gran potència en l'àmbit industrial, a causa de la baixa qualitat dels imants normalment d'AlNiCo amb pobres característiques de desmagnetització. Pel que fa al control d'aquest motor dols s'aplicava el criteri de màxim parell per amper consumit (MTPA), ja que el criteri de debilitació de camp (Field-Weakening) podia desmagnetitzar parcialment els imants reduint considerablement les prestacions del motor.

Tanmateix, al cap de pocs anys la indústria va desenvolupar nous imants amb millors prestacions com, NdFeB i SmCo que va permetre augmentar la potència i parell que són capaces de generar aquestes màquines fins al punt en què en l'actualitat s'usen com a màquines generadores en molins eòlics marits de megabits de potència. [9];[10];[11]



Figura 23 Màquina síncrona d'imants permanents

Els principals desavantatges d'aquest tipus de motors són:

- No hi ha una manera senzilla de canviar el camp magnètic generat pels imants permanents en funció de la càrrega. Així doncs, no es poden controlar les pèrdues magnètiques, de Foucault i Histèresis quan la càrrega està per sota de la nominal. Altrament, quan la càrrega és elevada la intensitat del camp magnètic hauria de ser màxima, no obstant aquesta és contant, per tant, la intensitat requerida a l'estator creix augmentant les pèrdues per efecte Joule.
- La construcció dels rotors és complexa i costosa, d'una banda, les terres rares per fabricar els imants són molt costoses i, d'altra banda, els imants generen uns grans camps magnètics que dificulten l'assemblatge dels mateixos sobre el rotor i la posterior manipulació d'aquest.
- No ens permet controlar el factor de potència de la màquina.

Els principals avantatges són:

- El rotor genera menor calor per unitat de parell si es compara amb un motor d'inducció.
- Màquines que permeten operar a baixes revolucions i un gran parell.
- Gran densitat de parell i potencia. Màquines més compactes.
- Major eficiència que un motor d'inducció
- Ofereixen la possibilitat d'operar com de fre regeneratiu.

12. Selecció de la tipologia de motor

Els requeriments més restrictius pel que fa al nou sistema motor són que tingui major o igual fiabilitat i rendiment que el sistema actual amb les mateixes prestacions.

Els motors de corrent continu i síncrons amb rotor bobinat no compleixen aquests requeriments, ja que aquests motors solen comptar amb escombretes, són, constructivament parlant, més complexos i, per tant, més cars, altrament requereixen més d'una font de tensió amb CC.

Els dos motors restants motors d'inducció i motor síncron d'imants permanents s'han d'avaluar amb més profunditat a partir de les limitacions tècniques per determinar la seva viabilitat.

Recordar que els requeriments de l'aplicació són:

Potència ≥ 75 kW

Parell Nominal ≥ 18.000 Nm

$$V_{\text{nominal}}: \frac{3,5}{1,65 \cdot 0,5} \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi} \approx 41 \text{ rpm}$$

Pel que fa a les limitacions dimensionals i de massa:

Diàmetre exterior < 1.650 mm

Massa < 1.950 kg

Longitudinal: No existeix cap limitació, ja que, el motor va muntat verticalment a la part superior de l'estació

Per avaluar s'ha cercat un motor de cada topologia, a continuació, es mostren els trets més característics d'aquests dos motors:

Tipus: Inducció rotor curtcircuitat

Tipus: Motor síncron d'imants permanents

Fabricant: ABB (HVM)

Fabricant: PARKER SSD PARVEX

Model: AMI 500L10L

Model: TMW40CLW

Alimentació: 690 V

Alimentació: 400V

Potència: 1.120 kW

Potència: 116 kW

Parell: 18.050 Nm

Parell: 22.100 Nm (Màx: 32.500 Nm)

V_{nominal}: 593 rpm

V_{nominal}: 50 rpm

Massa: 6.250 kg

Massa: 1.700 kg

Diàmetre màx: 1.245 mm

Diàmetre màx: 870 mm

Longitud màx : 2.420 mm

Longitud màx: 1.054 mm

Com es pot observar per al cas del motor d'inducció, si es vol implementar en un accionament directe, s'ha d'optar per un motor d'una gran potència, ja que, els fabricants no ofereixen motors asíncrons capaços de produir grans parrells a baixes revolucions.

Així doncs, els motors d'inducció també queden descartats per aquest estudi.

D'altra banda, el motor d'imants permanents, compleix amb tots els requeriments establerts. La densitat de parell i potència d'aquests motors en combinació amb l'elevat rendiment el converteixen en la màquina més idònia per aquest tipus d'aplicació. A partir d'aquest punt l'estudi se centrarà a avaluar aquest motor en concret.

13. Descripció del motor seleccionat

Existeixen diferents fabricants de motors d'imants permanents ABB, Siemens, Moog Industrial, etc. Això no obstant, els models que ofereixen aquests fabricants no compleixen amb la totalitat d'especificacions i limitacions del cas.

El model seleccionat TMW40CLW del fabricant PARKER SSD PARVEX, està especialment dissenyada per ser implementat en un accionament directe de baixes revolucions, ja que el motor, compta amb 48 pols i el rotor té disposats els imants de forma superficial, aquestes característiques permeten proporcionar un parell continu i sense vibracions, a baixes revolucions.

L'alimentació d'aquesta màquina és de 400 V i té una potència nominal de 116 kW. El parell nominal és de 22,1 kNm, i pot generar un parell màxim 32,5 kNm per un període de 20 segons. [12]

Per més informació tècnica del motor: Annex 1: Característiques del motor



Figura 24 Motor Parker models TMW

13.1 Implementació

Aspectes importants per la implementació d'aquest motor.

Variador de freqüència

Aquest motor haurà de comptar amb un variador de freqüència. L'opció més senzilla seria implementar un variador del mateix fabricant. El model suggerit és el AC890SD/4/0316G de PARKER SSD PARVEX. [12]

Refrigeració del motor

En aquest cas la refrigeració del motor és per aigua.

Per tant, seia necessari disposar d'una bomba elèctrica, un circuit de control mitjançant un termòstat i un dipositat que acompleixi les funcions d'acumulació i d'expansió.

El fabricant especifica els següents requisits i limitacions per aquest motor:

Un cabal mínim de 61 l/min a una temperatura màxima de 25 °C i una pressió de 5 bars. La caiguda de pressió en el motor és d'entre 1 i 2,5 bars i el volum del circuit intern del motor és 9,2 L.

Tanmateix, aquests requeriments són a una temperatura ambient de 40 °C i desenvolupant el parell nominal.

Així doncs, s'hauria d'avaluar de forma més detallada els requeriments reals de refrigeració del motor en l'emplaçament d'estudi (temperatura mitjana diürna de -3 °C amb màximes puntuals de 10 °C i operant en un rang d'entre el 33 % i 66 % del règim nominal un 90 % del temps).

Col·locació del motor

El fabricant proporciona el motor amb l'estructura de suport per ser muntat de forma horitzontal; tanmateix, en aquest cas el motor s'ha de muntar de forma vertical. Per tant, serà necessari dissenyar un suport o adaptar l'actual, que també es va dissenyar i fabricar per aquest projecte en qüestió, que permeti suportar el motor de forma vertical.

D'altra banda, la protecció del motor és IP54 inferior a la del motor reductor actual IP55 que està totalment a la intempèrie. La protecció IP54 és a prova de pols i d'esquitxades d'aigua des de qualsevol direcció.

Malgrat això, amb aquest nivell de protecció i a causa de les condicions meteorològiques extremes de l'emplaçament, es considera imprescindible col·locar una coberta que protegeixi el motor de les precipitacions i acumulacions de neu i gel.

Sistema de frenada

Serà necessari dissenyar un nou sistema de frenada per aquest accionament. En aquest tipus de remuntadors, com s'ha especificat anteriorment existeixen normalment dos tipus de fre, el de servei i el d'emergència.

En aquest cas es podria implantar els dos frens en un únic fre tipus mordassa actuant directament al diàmetre exterior del volant motriu, accionat per un sistema electró-hidràulic. Aquest fre tindria un funcionament invers, és a dir, la posició de repòs és la tancada, sent necessària una font d'energia exterior per a obrir-los.

En la parada de servei el fre actuaria un cop realitzada la rampa controlada de desacceleració de la instal·lació, un cop la velocitat del remuntador fos pràcticament zero, per evitar el retrocés. Tot minimitzant el desgast d'aquest.

En cas d'emergència, per exemple falta del subministrament elèctric o bé dispar d'algun sensor o protecció elèctrica, el fre actuaria des de l' instant zero. Aturant la instal·lació i evitant el retrocés d'aquesta.

Aquest tipus de fre s'utilitzen en altres instal·lacions per cable, com ara telecadires i telecabines.

La implantació d'aquest fre implicaria reemplaçar el volant motor actual per un volant del mateix diàmetre, però amb superfícies planes de lliscament al llarg de tot el perímetre del volant, apropiades per aquest tipus de fre, com es pot veure en la Figura 25.



Figura 25 Volant motriu telecadira

Efecte de l'altura en els paràmetres del motor

El fabricant ens proporciona la següent informació:

Entre una altitud de 1.000 a 4.400 m el parrell es redueix en un 5% per cada 1.000 m. En reduir-se la densitat de l'aire l'eficiència de la refrigeració es redueix, així com la rigidesa dielèctrica de l'aire, afavorint la possibilitat que es produeixin descàrregues parcials en moments de sobretensió.

De totes maneres, com s'ha esmentat anteriorment no es preveu grans requeriments de refrigeració, gràcies a l'emplaçament i el tipus de càrrega.

Així doncs, es considera que la reducció real en el parrell no serà tan notable com la proporcionada per l'expressió del fabricant:

$$h = 2.500 \text{ m}$$

$$F_{c.altitud} = 1 - \frac{(h - 1.000)}{1.000} * 0,05 = 1 - \frac{(2.500 - 1.000)}{1.000} * 0,05 = 0,925$$

Els, parells rectificats per aquesta altitud segons el fabricant són:

$$P_{Nominal} = 0,925 \cdot 22.100 = 20.442 \text{ Nm}$$

$$P_{Màxim} = 0,925 \cdot 32.500 = 30.062 \text{ Nm}$$

S'observa que tot i aplicar aquest criteri tan conservador el parell nominal està per sobre del requerit de 18.000 Nm.

14. Modelització del motor

Existeixen dos tipus de motors síncrons d'imants permanents, en funció de la col·locació dels imants en el rotor. El motor d'imants superficials, el seleccionat per aquesta aplicació, i els d'imants interns.

Els motors d'imants superficials sols disposen de parell electromagnètic. En canvi, les màquines d'imants interns compten amb el parell electromagnètic i reluctant, així doncs, són màquines que ofereixen densitats de parell i potència majors. El parell reluctant es produeix per l'asimetria en el rotor, ja que els imants, a efectes del flux magnètic, tenen una reluctància similar a la de l'aire.

Tanmateix, aquests últims a baixes revolucions no són capaces d'oferir un parell constant, sense vibracions. És per aquest motiu que per operar a baixes revolucions és millor el motor superficial.

El model del motor d'imants permanents és molt complicat d'analitzar en un sistema de referència trifàsic estàtic, no obstant això, aquest se simplifica molt quan se li apliquen les següents transformacions:

- La transformació Clarke, o també coneguda com a α - β , converteix un sistema trifàsic en un sistema de 2 fases ortogonals.
- D'altra banda, la transformació de Park, consisteix a introduir un eix de coordenades d-q que girin en sincronisme amb el camp magnètic de l'estator.

Se simplifica doncs el motor trifàsic, en un sistema de 2 fases ortogonals (transformació de Clarke), dues bobines col·locades ortogonalment, que giren a la velocitat de sincronisme (transformació de Park). [10]

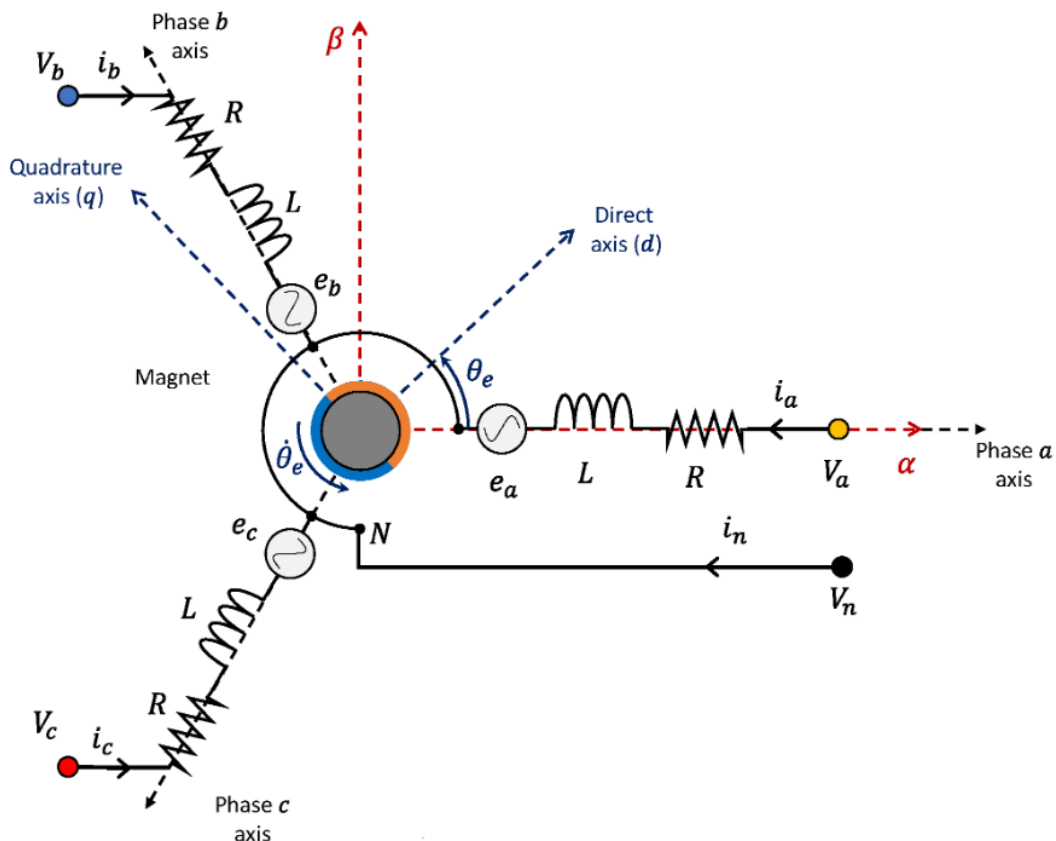


Figura 26 Diagrama fasorial del model d-q del motor

En aquest sistema de referència l'eix "d" s'orienta amb el flux magnètic del rotor, el "q" està avançat 90° respecte a aquest.

Així, la component creuada del flux del rotor esdevé igual a zero i s'obté una representació físicament comprensible de les relacions entre els components del parell, el flux i el corrent.

Les expressions de la tensió per aquestes dues “bobines giratòries”, que modelitzen el motor serà:

$$V_d = L_d \frac{di_d}{dt} - w_e L_q i_q + R i_d$$

$$V_q = L_q \frac{di_q}{dt} + w_e (L_d i_d + \Psi_{PM}) + R i_q$$

Amb Ψ_{PM} sent el flux magnètic generat pels imants permanents del rotor.

Ara bé per obtenir els valors reals de tensió de fase s'ha d'aplicar la següent expressió:

$$\begin{bmatrix} V_U \\ V_V \\ V_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_m & -\sin \theta_m \\ \cos(\theta_m + 240) & -\sin(\theta_m + 240) \\ \cos(\theta_m + 120) & -\sin(\theta_m + 120) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

El parell electromagnètic d'aquest motor d'imants superficials serà:

$$T = \frac{3}{2} p (\Psi_{PM} i_q)$$

Sent p el nombre de parells de pols.

Com es pot observar per les màquines superficials l'única component de corrent que contribueix en la generació de parell és la “iq”.

Així doncs, si es desitja aplicar el criteri de màxim parell per amper consumit o també conegut per les seves sigles en anglès MTPA, el valor de la “id” sempre haurà de ser 0. En aquestes condicions i considerant un règim estàtic l'expressió de les tensions se simplifica en:

$$V_d = -w_e L_q i_q$$

$$V_q = w_e \Psi_{PM} + R i_q$$

- **Velocitat de consigna**

S'estableix la velocitat de consigna del motor. Mitjançant la combinació d'un bloc tipus rampa per proporcionar la consigna de rampa d'acceleració constant amb un pendent:

$$a = \frac{\Delta n_m}{\Delta t} = \frac{40,51}{27} = 1,5 \frac{rpm}{s}$$

I un bloc de saturació que limita la velocitat màxima de la instal·lació a:

$$N_m^* = \frac{v}{R_M} \cdot \frac{30}{\pi} = \frac{3,5}{1,65 \cdot 0,5} \cdot \frac{30}{\pi} = 40,51 rpm$$

- **Modelització de la càrrega**

Per implementar la càrrega d'estudi en aquest model s'ha realitzat les següents simplificacions.

Es considera que la velocitat del vent inicialment de 18,5 m/s, en arrancar el remuntador, decreix fins als 15 m/s al cap de 27 segons, quan el remuntador assolit la velocitat màxima de 3,5 m/s i es manté constant. Per tant, el moment resultant de fregament amb l'aire és constant.

El coeficient de fregament "esqui-neu" es considera constant durant tota la simulació, amb un valor del 0,06. La primera dècima de segon durant l'acceleració hi ha una entrada tipus esglau que simula el fregament estàtic amb coeficient de 0,1 que és suma al parell constant de la càrrega.

Velocitat de consigna

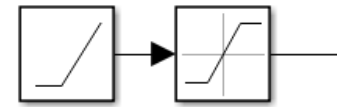


Figura 28 Blocs consigna de velocitat

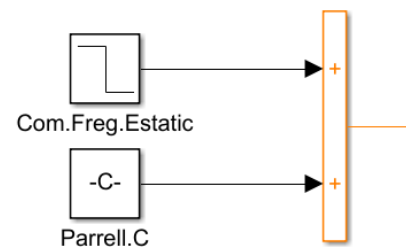


Figura 29 Blocs càrrega

El valor d'aquest esglau és de:

$$M_{Compensació(Fregament.Estàtic)} = M_{Usuaris(Fregament.Estàtic)} - M_{Usuaris(Fregament.Dinàmic)}$$

$$M_{Compensació(Fregament.Estàtic)} = 462 Nm$$

El moment d'acceleració angular dels elements rotatius i d'acceleració lineal dels elements flotants i usuaris es modelitza com una inèrcia equivalent a partir de la següent expressió:

$$J_{Equiv} = \frac{M_{Inèrcia+Freg} + M_{E.F(Accele.Lineal+Freg)} + M_{Usuaris((Accele.Lineal)}}{\alpha = a/r_m} = \frac{131,3 + 271,9 + 393,5}{\frac{3,5}{27} \cdot \frac{1}{1,65 \cdot 0,5}} = 5.070,4 kg \cdot m^2$$

Els valors dels parrells de l'expressió anterior s'han calculat en l'apartat: "10. Estimació dels requeriments de parell i potència".

A excepció del moment d'acceleració d'usuaris que no es va calcular de forma independent, tanmateix, l'expressió utilitzada és:

$$M_{Usuaris((Accele.Lineal)} = R_{motriu} \cdot m_{Usuaris} \cdot a = (1,65 \cdot 0,5) \cdot 3.680 \cdot \frac{3,5}{27} = 393,5 Nm$$

Així doncs, la càrrega es modelitza com un parrell constant i una inèrcia equivalent, amb els següents valors:

$$M_{càrrega} = M_{E.F(Equilibri)} + M_{Usuaris(Equilibri)} + M_{Usuaris(Fregament.E.N)} + M_{Aire}$$

$$M_{càrrega} = 1.438 + 9.588 + 677 + 4.641 = \mathbf{16.345 Nm + 462 Nm (per als primers 0,1 s)}$$

$$J_{Equiv} = \mathbf{5.070,4 kg \cdot m^2}$$

- **Controlador PI de velocitat**

A partir de l'error entre la velocitat de consigna i la real del motor, el controlador PI prèviament sintonitzat, proporciona el parell de consigna. Aquest, s'utilitza per calcular la intensitat "iq" mitjançant la següent expressió:

$$M = \frac{3}{2} p (\Psi_{PM} i_q)$$

Altrament, s'afegeix un bloc de saturació que limita el corrent de consigna als màxims estipulats pel fabricant.

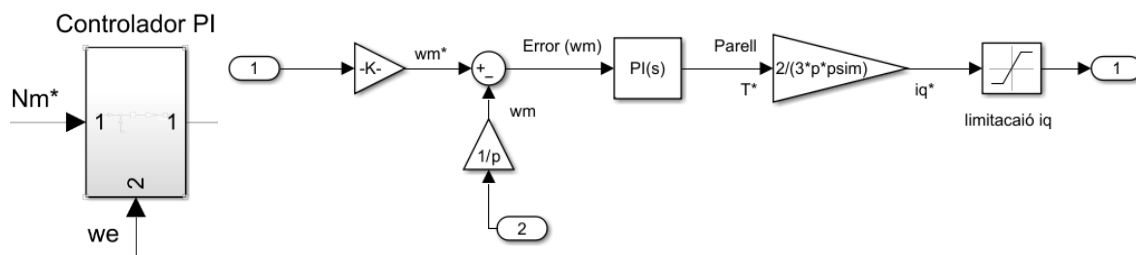


Figura 30 Bloc PI controlador velocitat

- **Controlador PI de corrent**

Aquest conjunt de blocs permet obtenir les tensions “ V_d ” i “ V_q ”. Les expressions utilitzades en aquest controlador són les següents:

$$V_d = L_d \frac{di_d}{dt} + Ri_d - w_e L_q i_q$$

$$V_q = L_q \frac{di_q}{dt} + Ri_q + w_e (L_d i_d + \Psi_{PM})$$

Els termes ombrejats en groc són les sortides dels controladors PI d'intensitat, la resta de termes, és el que s'anomena realimentació de compensació anticipada.

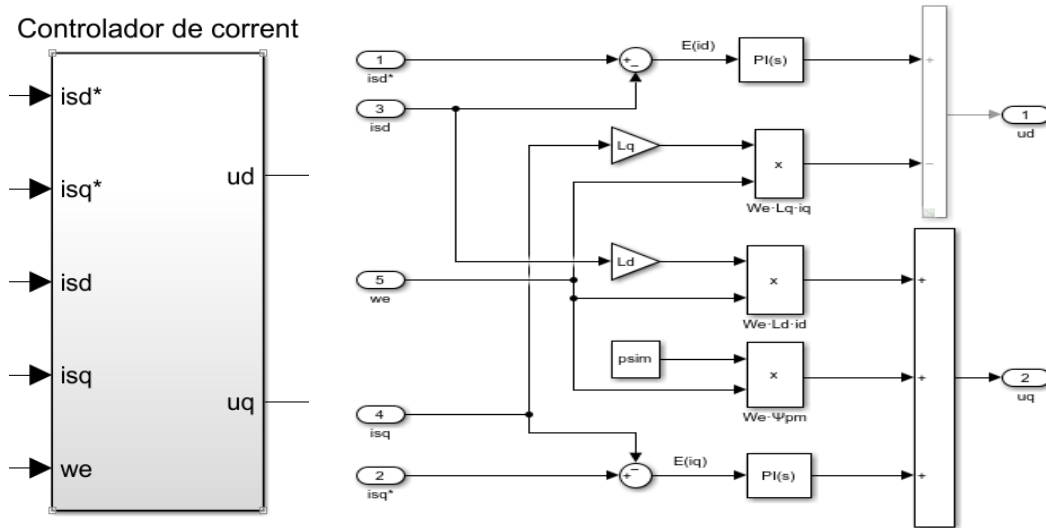


Figura 31. Bloc PI controlador intensitat

- **Canvi de referència de “d-q” a “U-V-T”**

Aquest bloc s'usa per obtenir els valors de consigna per les tensions de fase a partir de les tensions “Vd” i “Vq”. L'expressió matemàtica utilitzada per realitzar aquesta transformació és la següent:

$$\begin{bmatrix} V_U \\ V_V \\ V_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_m & -\sin \theta_m \\ \cos(\theta_m + 240) & -\sin(\theta_m + 240) \\ \cos(\theta_m + 120) & -\sin(\theta_m + 120) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

Aquesta s'obté d'aplicar principis bàsics de trigonometria per a projectar els valors de “Vd” i “Vq”, en els fasors de U, V i W.

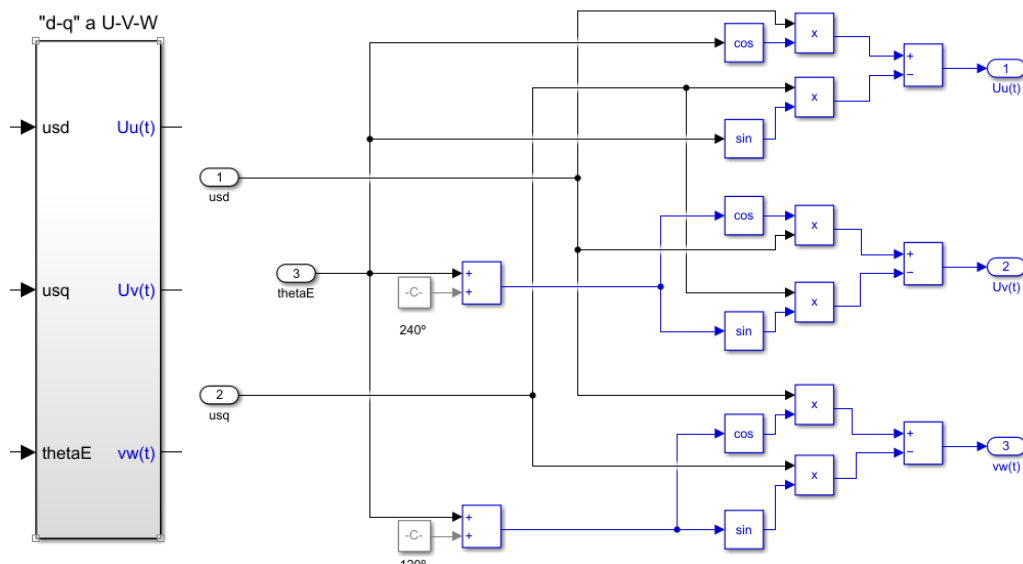


Figura 32 Bloc de transformació “d-q” a “U-V-W”.

• **Convertidor-Variador de freqüència**

El convertidor conte un rectificador i un inversor, ja que el senyal sinusoidal amb freqüència no constant, és gènere a partir d'un bus de contínua. Tanmateix, en aquest model la part del rectificador no està simulada, es parteix ja d'una constant anomenada U_{dc} , que és la tensió del bus de contínua.

La relació existent en la tensió de fase i la del bus de contínua per a l'inversor és la següent:

$$U_{DC} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot V_{f_{RMS}} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot 400 = 540,2 V$$

En aquest model se simula el control de l'inversor aplicant el principi de Modulació vectorial espacial o conegut també per les seves sigles en angles com SVM.

El primer pas és calcular els senyals de control a partir de les tensions de consigna. El model utilitzat és el següent:

$$U_{control_u} = (U_{un}^* - V_k) \cdot \frac{10}{U_{dc}}$$

$$U_{control_v} = (U_{vn}^* - V_k) \cdot \frac{10}{U_{dc}}$$

$$U_{control_w} = (U_{wn}^* - V_k) \cdot \frac{10}{U_{dc}}$$

Amb:

$$V_k = 0,5 \cdot [Max(U_{un}^*; U_{vn}^*; U_{wn}^*) + Min(U_{un}^*; U_{vn}^*; U_{wn}^*)]$$

Sent V_k una senyal triangular oscil·lant.

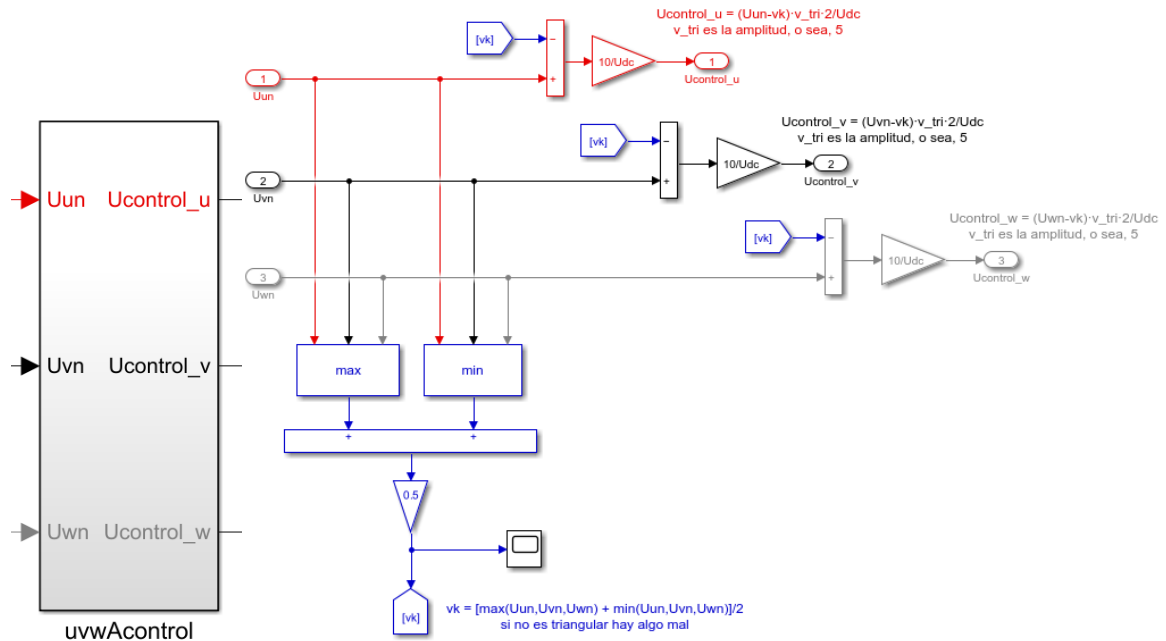


Figura 33 Blocs per obtenir les senyals de control

Un cop obtinguts aquests senyals s'aplica la següent funció, on es compara els senyals de control de les tres fases amb un senyal triangular:

$$U_{control_u} > \text{Senyal triangular} \Rightarrow \begin{matrix} Sí \rightarrow A = 1 \\ No \rightarrow A = 0 \end{matrix}$$

$$U_{control_v} > \text{Senyal triangular} \Rightarrow \begin{matrix} Sí \rightarrow B = 1 \\ No \rightarrow B = 0 \end{matrix}$$

$$U_{control_w} > \text{Senyal triangular} \Rightarrow \begin{matrix} Sí \rightarrow C = 1 \\ No \rightarrow C = 0 \end{matrix}$$

El senyal triangular té uns valors màxims i mínims de 5 i -5 respectivament i oscil·la a la freqüència, del canvi de transistors de l'inversor, de 10 kHz.

$$A \cdot U_{dc} - \frac{1}{3}(A \cdot U_{dc} + B \cdot U_{dc} + C \cdot U_{dc}) = U_{un}$$

$$B \cdot U_{dc} - \frac{1}{3}(A \cdot U_{dc} + B \cdot U_{dc} + C \cdot U_{dc}) = U_{vn}$$

$$C \cdot U_{dc} - \frac{1}{3}(A \cdot U_{dc} + B \cdot U_{dc} + C \cdot U_{dc}) = U_{wn}$$

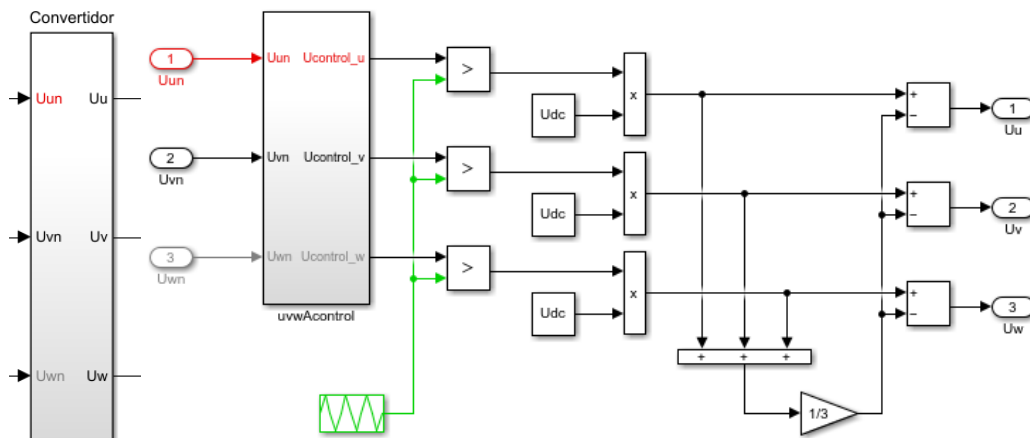


Figura 34 Blocs que modelitzen l'inversor

- Canvi de referència de "U-V-T" a "d-q"

Aquest bloc s'usa per obtenir els valors de les tensions "Vd" i "Vq" a partir de les tensions de fase proporcionades pel convertidor. Com es pot observar és l'expressió inversa del Bloc "Canvi de referència de "d-q" a "U-V-T"

$$\begin{bmatrix} V_U \\ V_V \\ V_W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_m & -\sin \theta_m \\ \cos(\theta_m + 240) & -\sin(\theta_m + 240) \\ \cos(\theta_m + 120) & -\sin(\theta_m + 120) \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

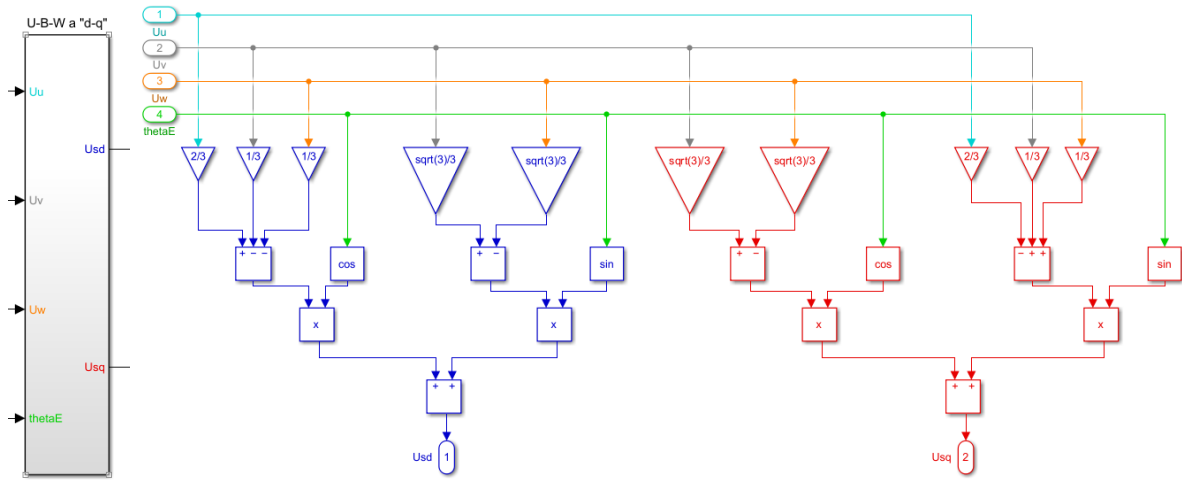


Figura 35 Bloc de transformació "d-q" a "U-V-W".

• **Motor**

Modelització del motor a partir del model “d-q”. S’usen les expressions anteriorment esmentades, les entrades d’aquest motor són les tensions U_d i U_q i les sortides les intensitats I_d i I_q conjuntament amb la velocitat angular elèctrica, que realimenten el sistema com es pot observar en l’esquema general, de la Figura 25. S’ha dividit el subsistema motor en tres blocs A, B i C que es detallaran a continuació:

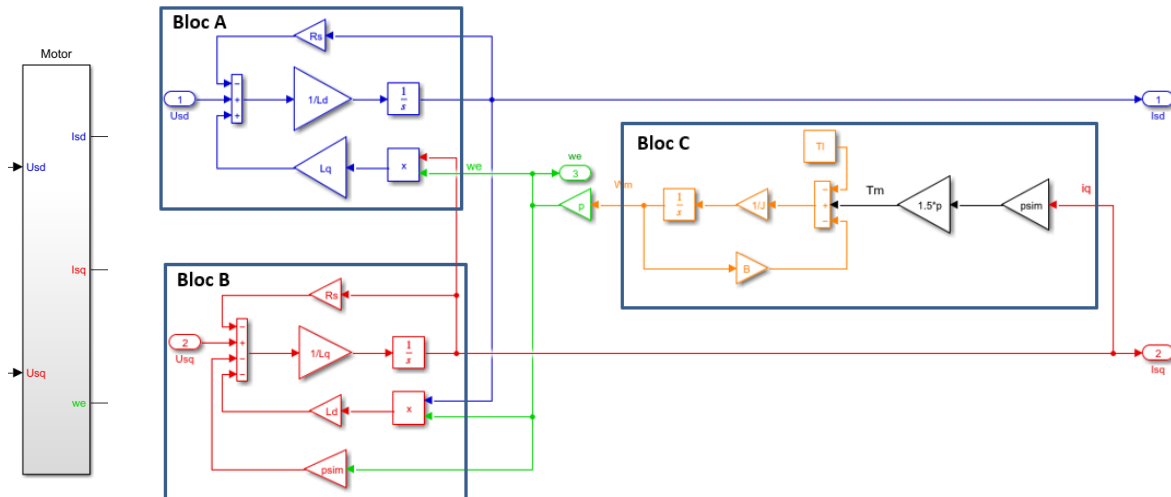


Figura 36 Subsistema motor

Bloc A: Aquest bloc permet obtenir el valor “id” a partir de la següent expressió:

$$V_d = L_d \frac{di_d}{dt} + R i_d - w_e L_q i_q$$

$$\frac{di_d}{dt} = (V_d - R i_d + w_e L_q i_q) / L_d$$

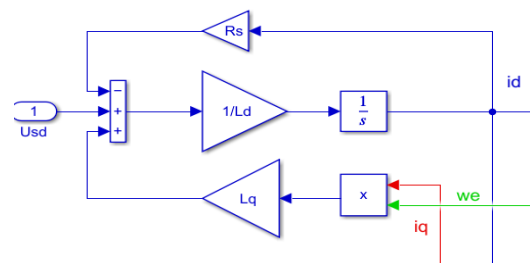


Figura 37 Conjunt blocs A

Bloc B: Aquest bloc permet obtenir el valor “iq” a partir de la següent expressió:

$$V_q = L_q \frac{di_q}{dt} + R i_q + w_e (L_d i_d + \Psi_{PM})$$

$$\frac{di_q}{dt} = (V_q - R i_q - w_e (L_d i_d + \Psi_{PM})) / L_q$$

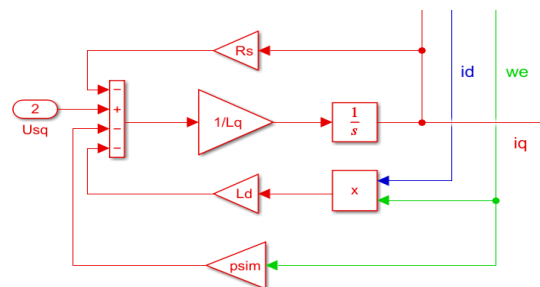


Figura 38 Conjunt blocs B

Blocs C:

Aquest bloc simula la part mecànica del motor:

Els blocs ressaltats de negre permeten calcular el parell produït per el motor a partir de la següent expressió:

$$T_M = \frac{3}{2}p(\Psi_{PM}i_q)$$

Els blocs ressaltats en taronja permeten determinar la velocitat angular del motor, aplicant la següent expressió:

$$T_M - T_{Load} - Bw_m = J \frac{dw_m}{dt} \rightarrow \frac{dw_m}{dt} = (T_M - T_{Load} - Bw_m)/J$$

Aquesta expressió s'obté d'aplicar la segona llei de Newton: $\sum T = J \frac{dw_m}{dt}$

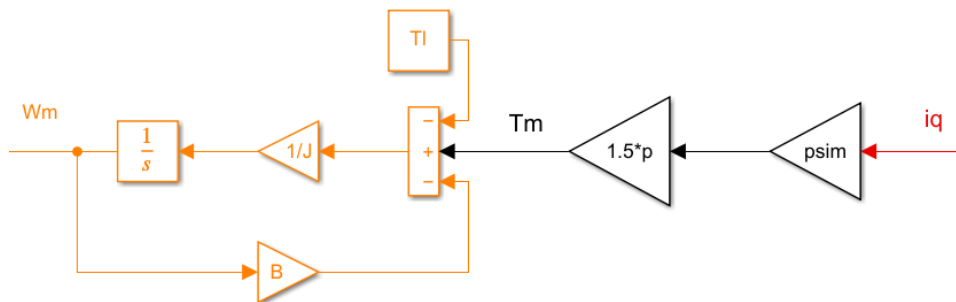


Figura 39 Conjunt de blocs C

15.1 Introducció de dades al model

Un cop obtingut el model s'ha d'introduir un conjunt de paràmetres elèctrics i mecànics per caracteritzar el motor i convertidors seleccionats així com la càrrega estudiada.

Paràmetres elèctrics del motor:

- p 24
- $I_{m\grave{a}x}^*$ 409 A
- $I_{m\grave{a}x}^*$ (Intensitat màx corregida pel factor d'altitud) 378 A
- $I_{sm\grave{a}x}^{**}$ [$I_s = \sqrt{2} \cdot I'_N$] 535 A
- U_0 5.110 V/1000 rpm

$$\Phi_{PM} = \frac{V_f}{\omega_e} = \frac{5.110 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}}{1000 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot 24} = 1,66 \text{ Wb}$$

- Φ_{PM} (Flux magnètic generat pels imants permanents) 1,66 Wb
- $L_q = L_d^{***}$ (Considerem la inductància de fuga menyspreable) ($L = L_{fase}/2$) 2,37 mH
- R_s ($R_s = R_{fase}/2$) 0,1245 Ω

* El motor pot operar aquesta intensitat per un període màxim de 0,8 segons.

** Intensitat de referència per l'estator: $I_s^2 = I_q^2 + I_d^2$. Com s'ha esmentat anteriorment $I_q = 0$ (MTPA), per tant, $I_s = I_q$.

***La inductància tant en la direcció "d" i "q" és la mateixa, ja que el rotor és simètric.

Paràmetres mecànics del motor:

- J_m (Inèrcia del rotor) 25,9 kg·m²

Paràmetres elèctrics convertidor:

- f_s 10 kHz
- $U_{línea}$ 400 V
- U_{dc} [$V_{DC} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot 400$] 540,2 V

Paràmetres de la càrrega

- T_m (Parell càrrega) 16.345 Nm
- J_m (Inèrcia càrrega) 5.070,81 kg·m²

15.2 Sintonització dels controladors PI de corrent i velocitat

Un cop modelitzat el conjunt motor, càrrega i convertidor s'han de sintonitzar els controladors de velocitat i corrent. [7]

15.2.1 Sintonització del Pi de corrent

Com s'ha esmentat anteriorment el controlador PI proporciona els valors ombrejats en groc de les següents funcions. Recordant que el valor $L_q=L_d=L$, l'expressió és:

$$V_d = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - w_e Li_q \quad V_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + w_e(Li_d + \Psi_{PM})$$

Aquestes tensions les anomenarem, V_d' i V_q' respectivament:

$$V_d' = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = V_d + w_e Li_q \Rightarrow \text{Sortida controlador PI}$$

$$V_q' = L \cdot \frac{di_q}{dt} + Ri_q = V_q - w_e(Li_d + \Psi_{PM}) \Rightarrow \text{Sortida controlador PI}$$

Es poden aïllar les intensitats com:

$$i_d = \frac{V_d' + w_e Li_q}{R+Ls} \quad i_q = \frac{V_q' - w_e(Li_d + \Psi_{PM})}{R+Ls}$$

L'expressió anterior és pot reescriure:

$$i_d = \frac{V_d'}{R+Ls} \quad i_q = \frac{V_q'}{R+Ls}$$

S'obtenen els següents sistemes que permeten relacionar els paràmetres elèctrics amb el controladors PI i que s'utilitzaran per sintonitzar-los:

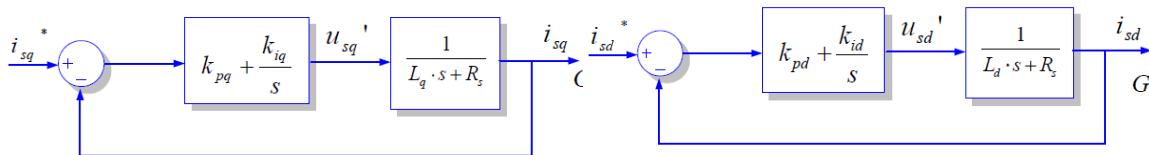


Figura 40 Diagrama de blocs dels controladors d'intensitat

Com es pot observar els dos esquemes son iguals, recordant que valor $L_q=L_d=L$.

Per tant: $K_{pq} = K_{pd} = K_p$ i $K_{iq} = K_{id} = K_i$

La funció de transferència d'aquest sistema amb llaç tancat, és:

$$H_{cl(d-q)} = \frac{k_p \cdot s + k_i}{L \cdot s^2 + (k_p \cdot R) \cdot s + k_i}$$

S'obté recordant $H_{cl} = \frac{H_{ol}}{1+H_{ol}}$, amb $H_{ol}(s) = (k_p + \frac{k_i}{s}) \cdot \frac{1}{R+Ls} = \frac{(k_p s + k_i)}{s \cdot (R+Ls)}$

El requisit indispensable per aquest controlador és que no produeixi un "overshoot" pel llaç tancat, ja que podria danyar el motor.

Per evitar-ho s'han de col·locar els pols del llaç obert perquè el sistema en llaç tancat mostri un comportament de primer ordre:

Així doncs, s'imposa que els pols i zeros del llaç obert tinguin el mateix valor.

- Els pol de la funció de transferència elèctrica és: $s = -\frac{R}{L}$
- I els zeros en el controlador són: $s = -\frac{k_i}{k_p}$

I s'obté:

$$\frac{R}{L} = \frac{k_i}{k_p} \rightarrow k_i = k_p \frac{R}{L}$$

Si introduïm aquesta relació en la funció de transferència del llaç obert, el llaç tancat es redueix també una funció de primer ordre:

$$H_{ol}(\frac{q}{d}) = \frac{k_p \cdot s + k_i}{s \cdot (R + Ls)} = \frac{k_i \frac{L}{R} s + k_i}{s(R + Ls)} = \frac{k_i(R + Ls)}{Rs(R + Ls)} = \frac{k_i}{Rs} = \frac{K}{s}$$

Per, tant $H_{cl} = \frac{H_{ol}}{1+H_{ol}} = \frac{K}{s+K}$. Funció de primer ordre. $H_{1oredre} = \frac{K1}{\tau s+1} = \frac{1}{\frac{1}{K}s+1}$

En aquest cas, el pol de la funció serà $s=-K$, sistema estable.

Quan la constant K és desplaça cap a l'esquerra, augmentant el valor de k_i la resposta del sistema és més ràpida.

Utilitzant aquesta funció i mitjançant un procés iteratiu, s'establirà la freqüència natural del control, que hauria de ser 10 cops més petita que la de mesura del convertidor, per assegurar l'estabilitat del llaç tancat.

Aquest sistema se simularà a "Matlab" ajustant la " k_p " i de retruc la " $k_i = k_p \frac{R}{L}$ " fins a obtenir una freqüència natural d'aproximadament 1.000 Hz $\Rightarrow 2.000 \cdot \pi$ rad/s, una desena part de la freqüència del convertidor que és de 10 kHz.

El protocol seguit durant el procés d'iteració és el següent:

1. Inicialment, es desconeix el valor de k_p , s'inicia la simulació amb una valor arbitrari de 0,1.
2. Si s'obté una resposta lenta, s'augmenta el valor de k_p , fins obtenir la resposta desitjada. ($f_c \approx 1.000$ Hz per una atenuació -3dB)

Per mesurar la freqüència natural es pren el punt pel qual l'amplitud en el diagrama de Bode és d'un 70,8 % equivalent a -3 dB.

$$A_d = 20 \cdot \log\left(\frac{E}{S}\right) = 20 \cdot \log(0,708) = -3dB$$

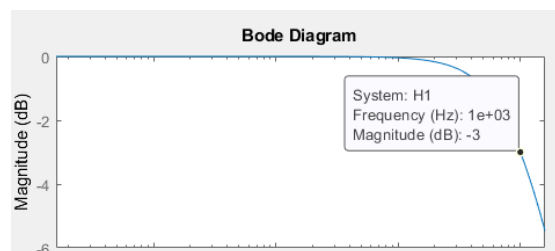


Figura 41 Diagrama de Bode del controlador PI d'intensitat

I finalment s'obtenen els següents valors:

$$K_p = 14.891$$

$$K_i = 782,25$$

15.2.2 Sintonització del PI de velocitat

El procediment seguit és el mateix que per al controlador d'intensitat. La funció de transferència en llaç tancat per sintonitzar aquest controlador és:

$$H_{cl}(\frac{q}{d}) = \frac{k_t \cdot (k_p \cdot s + k_i)}{J \cdot s^2 + k_p \cdot s + k_i}$$

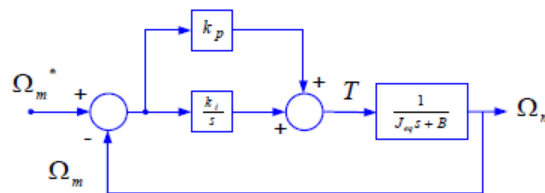


Figura 42 Diagrama de bolcs del controlador de corrent

Igualant els pols i els zeros de la funció de transferència en llaç tancat s'obté la següent relació:

$$k_i = k_p \frac{B}{J_{eq}}$$

Introduint aquesta funció al llaç tancat:

$$H_{ol}(\frac{q}{d}) = \frac{k_p \cdot s + k_i}{s \cdot (B + Js)} = \frac{k_p \cdot s + k_p \frac{B}{J_{eq}}}{s(B + Js)} = \frac{k_p(B + Js)}{Js(B + Js)} = \frac{k_p}{Js} = \frac{K}{s}$$

Per tant, $H_{cl} = \frac{H_{ol}}{1+H_{ol}} = \frac{K}{s+K}$. Funció de primer orde. $H_{1oredre} = \frac{K1}{\tau s+1} = \frac{1}{\frac{1}{K}s+1}$

En aquest cas, es defineix la freqüència natural de 100 Hz. Realitzant el mateix procés iteratiu explicat en l'apartat anterior s'obté:

$$K_p = 3.202.357,338$$

$$K_i = 0 \text{ (la constant de fregament viscos, B es considera 0)}$$

16. Simulacions

S'ha simulat l'escenari A on s'estableix les següents condicions:

Escenari A

- Arrencada de la instal·lació. Instant inicial, velocitat de 0 m/s.
- Línia ascendent totalment carregada amb 46 usuaris amb una massa unitària de 80 kg.
- Línia descendent sense cap perxa totalment descarregada.
- Vent frontal amb una velocitat de 15 m/s (54 km/h)

És l'escenari més desfavorable.

16.1 Simulació escenari A amb els requeriments cinemàtics actuals

En aquestes simulacions s'avaluarà la resposta de la velocitat de la instal·lació respecte a la consigna. Així com, les intensitats i voltatges del motor.

16.1.1 Resposta de la velocitat

S'avalua la resposta mitjançant el següent gràfic.

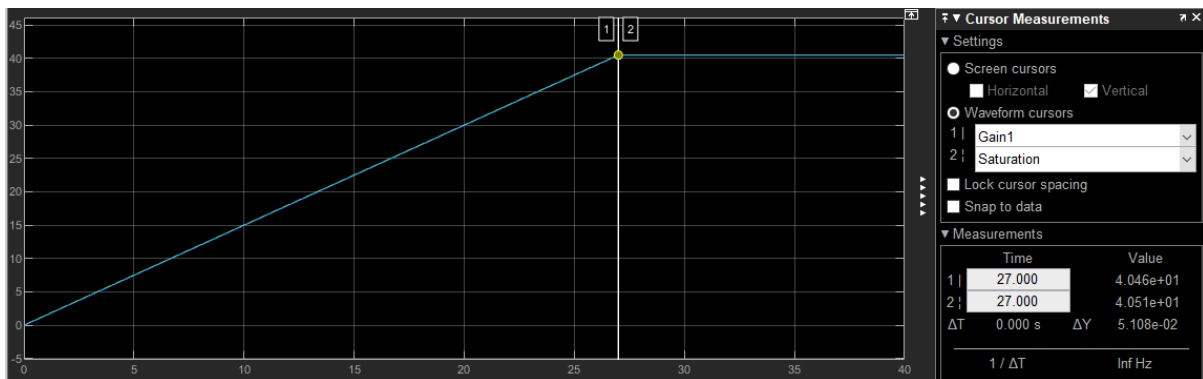


Figura 43 Resposta de la velocitat amb els requeriments cinemàtics actuals

En aquest gràfic l'eix "Y" representa la velocitat en revolucions per minut i l'eix "X" el temps en segons.

Aquest gràfic mostra el senyal de consigna de velocitat així com la velocitat real del motor, no obstant a l'estar perfectament superposades no es poden distingir una de l'altra.

S'obté, doncs, una resposta perfecta, sense "overshoot" i amb una acceleració constant.

D'altra banda recordar, que els requeriments cinemàtics actuals per la instal·lació són:

$$a = \frac{\Delta n_m}{\Delta t} = \frac{40,51}{27} = 1,5 \frac{rpm}{s}$$

$$N_{m \text{ màx}}^* = \frac{v}{R_M} \cdot \frac{30}{\pi} = \frac{3,5}{1,65 \cdot 0,5} \cdot \frac{30}{\pi} = 40,51 \text{ rpm}$$

16.1.2 Corrents al motor

El gràfic que es mostra a continuació representa les intensitats I_q i I_d del motor. En l'eix "Y" es representa la corrent en amperis i en l'eix "X" el temps en segons.

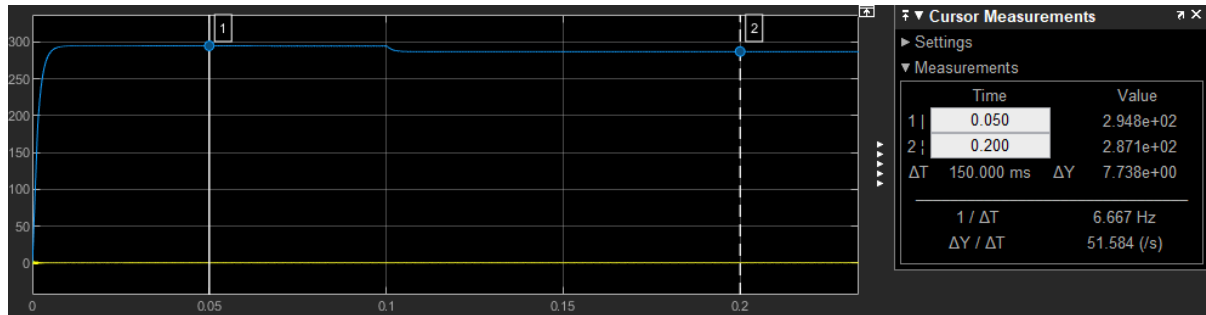


Figura 44 Corrent I_q i I_d del motor.

La línia blava és la intensitat I_q i la línia groga la I_d . La I_d és igual a zero pel criteri de MTPA.

La I_q s'observa que té un màxim durant la primera dècima de segon, corresponent a l'efecte del fregament estàtic esquí-neu. Aquesta és la intensitat màxima durant la maniobra d'arrancada de la instal·lació i té una durada de 0,1s.

$$I_{qmàx} = 294,8 \text{ A}$$

La intensitat de fase serà de:

$$I_{fase} = \frac{I_{qmàx}}{\sqrt{2}} = \frac{294,8}{\sqrt{2}} = 208 \text{ A}$$

Considerablement per sota del màxim estipulat pel fabricant i corregit pel factor d'altitud de:

$$I'_{fase.Màx.fabricant} = 378,7 \text{ A (per a un període de 0,8 s)}$$

De fet la relació és de: $Ri = \frac{208}{378,7} \cdot 100 = 67,51 \%$.

Superat aquest primer període la intensitat decreix fins a:

$$I_{qAccel.} = 287,1 \text{ A} \quad I_{fase} = \frac{I_{qAccel.}}{\sqrt{2}} = \frac{294,8}{\sqrt{2}} = 198,7 \text{ A}$$

No obstant ara s'ha de comprovar respecte al valor del corrent nominal corregit pel factor d'altitud, ja que la durada de la rampa d'acceleració, 27 segons, superior als 0,8 segons que estipula el fabricant

$$I'_{fase.Nom.fabricant} = 250,67 \text{ A per a un període de 0,8 s}$$

S'observa que la relació és de $Ri = \frac{198,7}{250,7} \cdot 100 = 79,25 \%$.

Per tant, el motor operarà àmpliament dins del rang d'intensitats estipulat pel fabricant.

16.1.3 Tensions al motor

El següent gràfic representa els valors de consigna de les tensions $V_u(t)$, $V_v(t)$ i $V_w(t)$.

Eix "Y" representa la tensió en volt i l'eix "X" el temps en segons.

Com és d'esperar el mòdul i freqüència d'aquestes tensions augmenta durant la rampa d'acceleració.

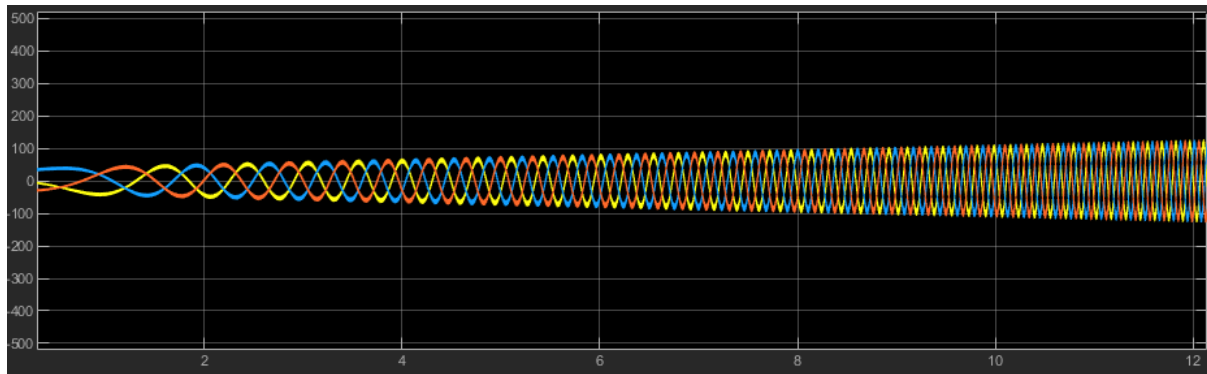


Figura 45 Tensions de fase de consigna

16.2 Simulació escenari A amb nous requeriments cinemàtics

S'estipula els nous requeriments cinemàtics en funció dels límits que imposa la normativa.

La normativa estipula:

- Acceleració màxima de $1,5 \text{ m/s}^2$
- Velocitat màxima de $3,75 \text{ m/s}$

Es modifica els paràmetres dels blocs d'entrada amb els següents valors:

$$a = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1 \text{ rev}}{2\pi R} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 17,36 \frac{\text{rpm}}{\text{s}}$$

$$N_m^* = \frac{v}{R_M} \cdot \frac{30}{\pi} = \frac{3,75}{1,65 \cdot 0,5} \cdot \frac{30}{\pi} = 43,4 \text{ rpm}$$

Com es pot observar, per aquestes condicions existeix un decalatge entre els dos senyals. Ja que el bloc de saturació de corrent, actua, limitant el corrent als valors establerts pel fabricant, per tant, el motor no pot generar el parrell suficient per accelerar la instal·lació amb els valors de consigna.

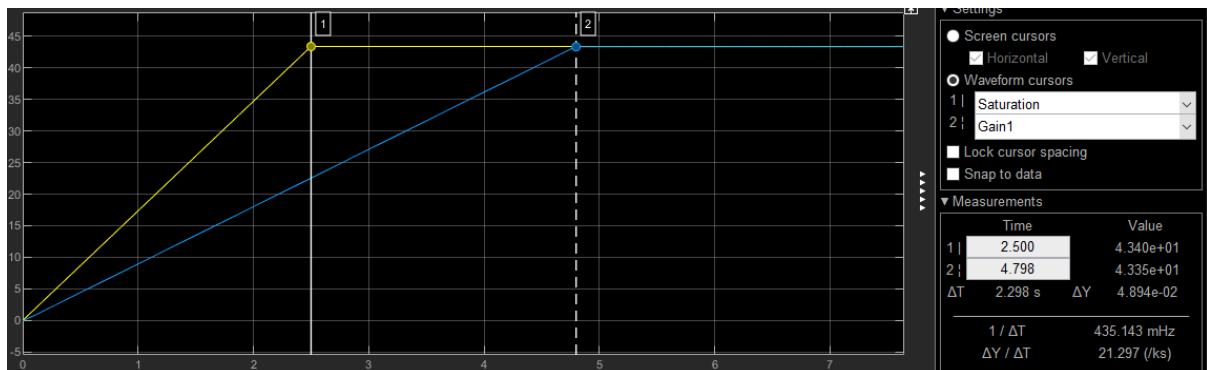


Figura 46 Resposta de la velocitat amb els nous requeriments cinemàtics

En aquestes condicions el motor té un pic de corrent a l' instant 3,75 ms de $I_q = 364$ A.

$$I_{f\text{ase}} = \frac{I_{q\text{m}\acute{a}\text{x}}}{\sqrt{2}} = \frac{364}{\sqrt{2}} = 257 \text{ A} < I'_{f\text{ase.M}\acute{a}\text{x.fabricant}} = 378,7 \text{ A}$$

Per tant, aquest pic de corrent no suposa cap perill per al motor.

Posteriorment, s'estabilitza al valor nominal de $I_q = 364$ A, per l'efecte del bloc de saturació.

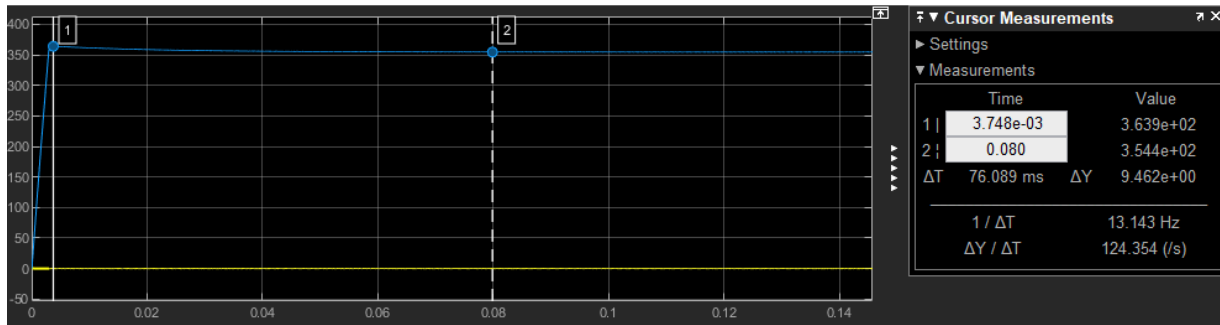


Figura 47 Corrent I_q i I_a del motor.

Així doncs, les prestacions màximes cinemàtiques que podem extreure d'aquest motor són les següents:

$$a = \frac{\Delta n_m}{\Delta t} = \frac{43,4}{4,8} = 9 \frac{rpm}{s} \quad N_m^* = 43,4 rpm$$

Una acceleració 6 cops superiors a l'actual. I una velocitat que permet reduir el temps de trajecte en 13 segons.

A continuació, es mostra una taula on es comparen les prestacions dels dos sistemes:

Taula 8 Taula comparativa de prestacions

	Actual	Nou sistema
Acceleració actual	1,5 rpm/s	9 rpm/s
Durada del trajecte	3 min i 6 s	2 min i 53 s
Capacita	900 us./hora	964 us./hora

17. Anàlisi de costos

I finalment s'avaluaran els costos inicials, de funcionament i manteniment de cada tipus d'accionament per a un període de 15 anys.

Sistema actual: motor reductor

Tipus	Motor d'inducció amb reductor. SEW-EuroDrive model RF167AM280/RS	
Cost d'adquisició motor reductor	Final per al client	36.000 €
Cost d'adquisició variador de freqüència i panell de control	S'estima un valor molt similar per als dos equips. De fet, els dos equips tindrien la mateixa potència, compartint molts components de hardware.	(...)
Cost de transport i instal·lació	Es considera molt similar per als dos casos. El pes i volumetria dels dos equips és força similar, els dos proveïdors estan pròxims, Saragossa, i finalment la complexitat d'instal·lació és similar.	(...)
Despeses de manteniment i inspeccions	Canvi de lubricant Capacitat 82 l. Periodicitat anual. Shell Omala HD 150 Cost 138€/20L Cost mà d'obra 60 € $C = 82 \cdot \frac{138}{20} + 60 = 626 \text{ €}$	626 €/any
	Inspecció in situ de la reductora. Periodicitat anual	400 €/any
	Inspecció a taller de la reductora. Periodicitat cada 10 anys	10.000 €/10 anys
	Inspecció in situ del motor. Periodicitat cada 5 anys	400 €/5 anys
Consum elèctric	Temporada mitjana 130 dies. 7 hores diàries de funcionament. De mitjana s'opera un 80% del temps. Escenari de funcionament C, el més freqüent: Potència útil 33 kW. Cost electricitat 0,2 €/kWh $P_{consumina} = \frac{P_{útil}}{\eta} = \frac{33}{0,77} = 42,86 \text{ kW}$ $E_{consumina} = P_{consumina} \cdot t = 41,25 \cdot 130 \cdot 7 \cdot 0,8 = 30.030 \text{ kW} \cdot h$ $Cost = E_{consumina} \cdot c = 6.240 \text{ €/anuls}$	6.240 €/any
Cost total per un període de 15 anys		161.190 €

Proposta: Accionament directe

Tipus	Motor d'imants Permanents. PARKER SSD PARVEX model TMW40CLW	
Cost d'adquisició motor [12]	Final per al client	110.000 €
Cost d'adquisició variador de freqüència	S'estima un valor molt similar per als dos equips. De fet, els dos equips tindrien la mateixa potència, compartint molts components de hardware.	(...)
Cost de transport i instal·lació	Es considera molt similar per als dos casos. El pes i volumetria dels dos equips és força similar, els dos proveïdors estan pròxims, Saragossa, i finalment la complexitat d'instal·lació és similar.	(...)
Cost extra implementació	Es considera el cost d'adquisició i instal·lació el sistema de refrigeració per aigua, així com, la coberta de protecció i el nou sistema de fre.	20.000
Despeses de manteniment i inspeccions	Canvi de lubricant	(...)
	Inspecció in situ de la reductora. Periodicitat anual	(...)
	Inspecció a taller de la reductora. Periodicitat cada 5 anys	(...)
	Inspecció in situ del motor. Periodicitat cada 5 anys	400 €/ 5 anys
Consum elèctric	Temporada mitjana 130 dies. 7 hores diàries de funcionament. De mitjana s'opera un 80% del temps. Escenari de funcionament C, el més freqüent: Potència útil 33 kW. Cost electricitat 0,2 €/kWh $P_{consumina} = \frac{P_{útil}}{\eta} = \frac{33}{0,82} = 35 \text{ kW}$ $E_{consumina} = P_{consumina} \cdot t = 35 \cdot 130 \cdot 7 \cdot 0,8 = 25.480 \text{ kW} \cdot h$ $Cost = E_{consumina} \cdot c = 5.860 \text{ €/anuls}$	5.860 €/any
Cost total per un període de 15 anys		219.093 €

Es conclou, per tant, que no compleix amb el requisit econòmic especificat a l'inici de l'estudi.

18. Avaluació mediambiental

Per analitzar l'impacte mediambiental d'aquest reemplaçament s'hauria d'analitzar el cicle de vida dels dos accionaments i comparar-los. L'anàlisi del cicle de vida és una anàlisi complexa en què s'avalua els impactes ambientals al llarg de tota la vida del producte.

Resumint el mencionat anteriorment i a mode comparació es realitza la següent taula on s'avalua en termes genèrics i qualitius els principals impactes de cada accionament.

Taula 9 Avaluació mediambiental

	Accionament Actual (Motor Reductor)	Accionament Proposar ("Direct Drive")
Fabricació	Impacte ambiental reduït, en comparació	Impacte ambiental elevat
Vida Útil	La vida útil dels dos accionaments es considera aproximadament la mateixa.	
Consumibles	Olis i lubricants	Cap
Eficiència energètica	Menor	Major
Impacte ambiental derivat de manteniments i reparacions	Major	Menor

Així doncs, es conclou, que implementar un sistema o altre generà un impacte ambiental similar, per tant, no és un factor decisiu pel que fa a la selecció de l'accionament com si ho és el factor econòmic.

19. Planificació

A continuació a la Figura 48 es mostra el diagrama de Gantt de l'estudi. Aquest recull les tasques principals per a la realització d'aquest treball, així com la data d'inici i final prevista de cadascuna.

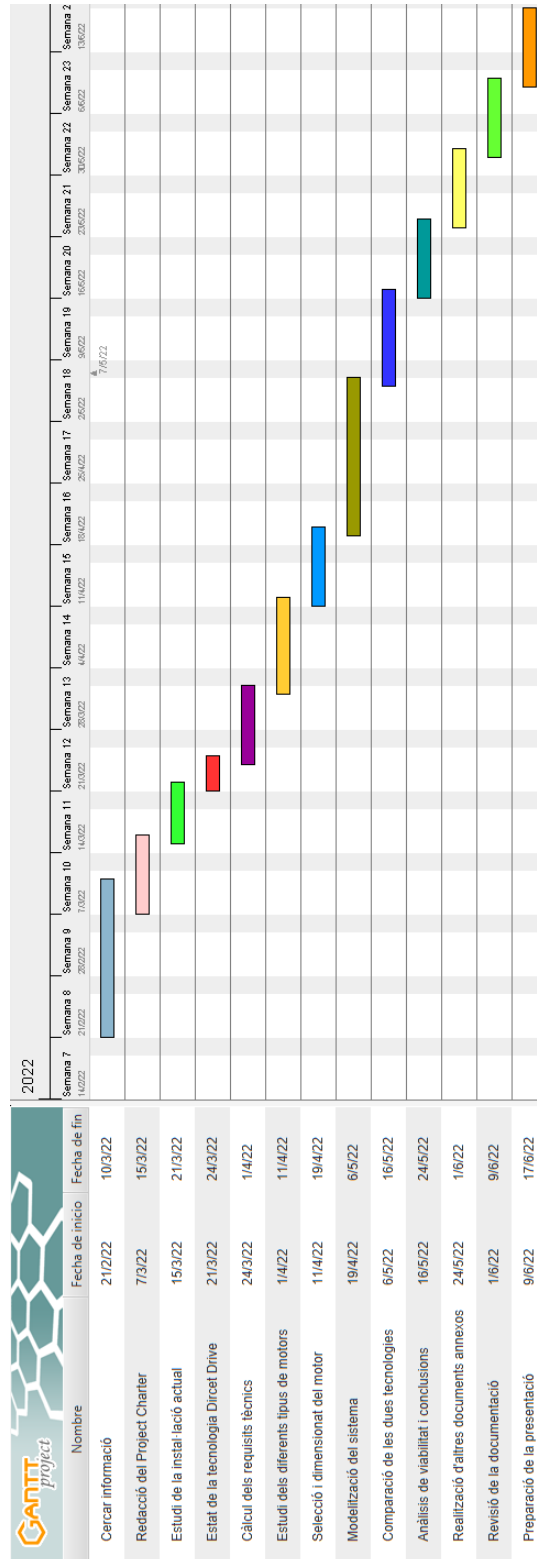


Figura 48 Diagrama de Gantt

20. Conclusions

L'objecte d'aquest estudi és determinar la viabilitat tècnica i econòmica d'implementar un accionament directe en un remuntador de petita mida, com és el cas del telesquí de Puig Falcó a l'estació d'esquí de Boi Taüll.

Actualment, aquest tipus d'accionament ja s'ha utilitzat en remuntadors de major capacitat i grandària com poden ser telecadires i telefèrics.

Pel que fa a la viabilitat tècnica, s'ha determinat que és un accionament viable, que permet millorar les prestacions cinemàtiques de la instal·lació, augmentant la seva capacitat; així com millorar el rendiment global de la instal·lació; reduint al mateix temps els costos de manteniment i reparació.

La màquina elèctrica més apropiada és el motor síncron, d'imants permanents col·locats superficialment en el rotor, ja que permet oferir un gran parell a baixes revolucions sense vibracions.

Altrament, cal destacar que la implantació d'aquest tipus d'accionament no és directa. És necessari redissenyar sistemes com el fre d'emergència i servei, el sistema de control i alimentació, així com determinar els requeriments de refrigeració necessaris i dissenyar si escau un sistema auxiliar.

Tanmateix, no compleix amb el requisit econòmic. La diferència entre el cost de funcionament i manteniment, al cap de 15 anys, de l'accionament directe respecte l'actual és de 57.903 €.

El punt d'equilibri entre els dos sistemes és d'aproximadament 39 anys, entorn de la vida mitjana d'aquest tipus d'instal·lació a les estacions d'esquí Espanyoles, però molt per sobre de les estacions d'esquí Alpines per exemple, on la vida mitjana sol ser d'uns 20 anys.

Tant els fabricants com la quota més gran de mercat en l'àmbit Europeu per aquest tipus de remuntadors estan emplaçats als estats Alps.

D'altra banda, en termes monetaris la gran diferència entre els dos sistemes, és en el preu d'adquisició dels motors, el motor síncron és aproximadament tres cops més car que el motor reductor asíncron.

Així doncs, si el preu d'aquests motors d'imants permanents no es redueix, difícilment es produirà la implementació d'aquesta tecnologia en aquests remuntadors.

Finalment, cal destacar que la tendència del preu a curt i mitjà termini és clarament creixent a causa de l'escassetat i monopoli de les anomenades "terres rares" necessàries per fabricar els imants i l'alta demanda impulsada pel sector de l'automoció.

19. Bibliografia

- [1]. **ICGC.** Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. [En línia] [Data: 20 / 3 / 2022.]
<https://www.icgc.cat>
- [2]. **Servei Meteorològic de Catalunya.** meteo.cat. [En línia] [Data: 15 / 3 / 2022.]
<https://www.meteo.cat>
- [3]. **remontees-mecaniques.** remontees-mecaniques. [En línia] [Data: 25 / 2 / 2022.]
www.remontees-mecaniques.net
- [4]. **Virto Albert, Luis.** Bibliotècnia. *Mecànica de fluids : fonaments.* [En línia] [Data: 18 / 3 / 2022.]
https://discovery.upc.edu/iii/encore/record/C_Rb1088799_SMecanica%20de%20fluids_Orightresult_U_X7?lang=cat&suite=def
- [5]. **Orro, Alfonso, Novales, Margarita i Rodríguez, Miguel.** *Transporte por Cable.* A Coruña : Tórculo Artes Gráficas, 2003. ISBN: 84-688-3536-6.
- [6]. **2020 Doppelmayr Seilbahnen GmbH.** Doppelmayr Garaventa. [En línia] [Data: 2 / 4 / 2022.]
<https://www.doppelmayr.com/es/productos/>
- [7]. **Wilaeba Electronica.** Sistema de segundo orden subamortiguado. [En línia] [Data: 28 / 4 / 2022.]
<https://wilaebaelectronica.blogspot.com/2019/03/sistema-de-segundo-orden-subamortiguado.html>
- [8]. **Aname Instrumentación Científica.** Sistema medida fricción . [En línia] [Data: 25 / 3 / 2022.]
<https://www.medidafuerzaytorsion.com/index.php/es/equipos-de-medicion/category/52-medida-de-friccion?jij=1655370237883>
- [9]. **Juha Pyrhönen.** LUT, Department of Electrical Engineering. PMSM.[En línia] [Data: 12 / 4 / 2022.]
[https://ocw.nthu.edu.tw/ocw/upload/124/news/\[%E9%9B%BB%E5%8B%95%E6%A9%9F%E6%A2%B0L14%E8%A3%9C%E5%85%85%E6%95%99%E6%9D%90\]LUT_PERMANENT%20MAGNET%20SYNCHRONOUS%20MACHINE.pdf](https://ocw.nthu.edu.tw/ocw/upload/124/news/[%E9%9B%BB%E5%8B%95%E6%A9%9F%E6%A2%B0L14%E8%A3%9C%E5%85%85%E6%95%99%E6%9D%90]LUT_PERMANENT%20MAGNET%20SYNCHRONOUS%20MACHINE.pdf)
- [10]. **Documentació de l'assignatura CONTROL DE MÀQUINES ELÈCTRIQUES.** UPC ESEI-AAT. [En línia] [Data: 16 / 4 / 2022.]
- [11]. **Hewa Gamage i Nandun Senevirathna Orro.** *Design of a Permanent Magnet Synchronous Motor for an Electric Traction Application. Transporte por Cable.* Universidad de Oviedo.[En línia] [Data: 2 / 5 / 2022.]
file:///C:/Users/MSI/Downloads/NANDUN_SENEVIRATHNA_Master_Thesis_FinalVersion.pdf
- [12] **Technical Manual PVD 3622.** Parker and Perverx. [En línia] [Data: 15 / 5 / 2022.]
<https://www.parker.com/Literature/Electromechanical%20Europe/Parvex/PVD3622-GB.pdf>