

Treball de Fi de Màster
Màster Universitari en Enginyeria Industrial
especialització en Mecànica

Disseny mecànic del prototip d'un connector
Automàtic per a vehicles industrials elèctrics

MEMÒRIA

Autor: Arnau Bañón
Director: Carles Domènech
Convocatòria: Juny 2021



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





Resum

L'objectiu principal d'aquest projecte es el disseny del prototip d'un connector automàtic per a vehicles elèctrics industrials. En el projecte es defineix conceptualment el sistema sencer però únicament s'entra en el detall mecànic. Inicialment s'analitzen les solucions existents en l'actualitat que podrien aplicar-se al disseny en qüestió i els vehicles als quals s'orientarà el projecte, les carretes elevadores elèctriques. D'aquest anàlisi s'obtenen les especificacions que ha de tenir el disseny per a complir amb el seu objectiu i es presenten de forma conceptual un grup de solucions de la qual se n'escull la més adequada. La solució escollida es materialitza amb el programa SolidWorks i posteriorment es valida el disseny utilitzant MatLab per a realitzar els càlculs per a totes les condicions possibles en les que pot treballar el sistema. Finalment es genera la documentació necessària, plànol de conjunt i plànols de peces, per a la fabricació i muntatge del sistema.

Sumari

Sumari	5
1. Introducció	10
1.1 Objectius del projecte	11
1.2 Abast	12
2. Estat de l'art	13
2.1 Vehicles elèctrics a la indústria	13
2.2 Procés de carrega en vehicles elèctrics	14
2.3 Viabilitat del projecte	17
3. Anàlisi del concepte	20
3.1 Coordenades per l'anàlisi	23
3.2 Rang dels graus de llibertat	25
3.3 Rang de coordenades	29
3.4 Connexió	31
4. Especificacions	35
5. Disseny conceptual	37
5.1 Sistema general	37
5.2 Detecció de posició	39
5.3 Sistema mecànic coordenades x i y	40
5.4 Sistema mecànic angle alfa	43
5.5 Sistema mecànic en z	44
6. Síntesi del mecanisme	46
6.1 Anàlisi geomètric	46
6.2 Anàlisi cinemàtic	48
6.3 Anàlisi de forces estàtiques	51
6.4 Anàlisi de forces dinàmiques	52

6.5 Espai de treball	54
7. Disseny de materialització	57
7.1 Dimensionament general	58
7.2 Actuadors del robot de diamant	62
7.3 Actuator sistema de politges	65
7.4 Sistema de politges i corretges	67
7.5 Acoblament dels actuadors	70
7.6 Base del sistema	75
7.7 Articulació fixe del braç complex	76
7.8 Braç proximal complex	84
7.9 Articulació del colze complex	86
7.10 Braç distal complex	91
7.11 Braç simple	95
7.12 Articulació de la mà	98
8. Disseny de detall	105
8.1 Consideracions generals	105
8.2 Necessitats rodaments	106
8.3 Bloqueig axial rodament superior	107
8.4 Dimensionat del eix de la mà	107
8.5 Ajust i muntatge entre el suport i la roda inferior de la mà	109
8.6 Ajust politja i rodes	112
9. Pressupost	114
9.1 Pressupost de prototip	114
9.2 Pressupost d'enginyeria	116
9.3 Cost total del projecte	117
10. Estudi ambiental	118

11. Conclusions **119****Bibliografia** **121****Índex de figures**

Fig. 1 Estratègies de càrrega per a vehicles elèctric industrials. (Toyota, s.d.)	14
Fig. 2 Definició del control per l'acoblament automàtic del vehicle. (Pérez, Nashashibi, Lafeudeux, Resende, & Pollard, 2013)	15
Fig. 3 Estació de càrrega autobús elèctric pantògraf avall. (ABB, s.d.)	16
Fig. 4 Estructura del sistema WAVE. (Ideanamics, s.d.)	16
Fig. 5 (Esquerra) Estació de càrrega de bateries externes, (Dreta) Connexió al vehicle. (Volkswagen, 2019)	17
Fig. 6 Braç robot de Iqus, Robolink RL-DP. (Iqus, s.d.)	18
Fig. 7 Parts de la carreta elevador elèctric. Font (Toyota, 2017).	20
Fig. 8 Carreta elèctrica elevadora EFG 213-220. (Jungheinrich, s.d.)	22
Fig. 9 Eixos de coordenades i angles del sistema. (Font pròpia)	23
Fig. 10 Planta del vehicle estacionat a la zona de càrrega. (Font pròpia)	24
Fig. 11 Alçat del vehicle estacionat a la zona de càrrega. (Font pròpia)	25
Fig. 12 Dimensions Europalet. (Esnova, 2019)	26
Fig. 13 Pala de la carreta elevadora. (Font pròpia)	27
Fig. 14 Pala de la carreta dins el forat del Europalet. (Font pròpia)	27
Fig. 15 Representació desviació angular pala dins del forat. Font Propia	28
Fig. 16 Representació de la inclinació de la carreta per desgast de les rodes.	30
Fig. 17 CAD connector. (Font pròpia)	33
Fig. 18 Toleràncies de descentrament en l'acoblament. (Staübli, s.d.)	34
Fig. 19 Toleràncies de desalineament en l'acoblament. (Staübli, s.d.)	34
Fig. 20 Aruco markers. (Babinec, Jurisica, Hubinsky, & Duchon, 2014)	39
Fig. 21 Proposta de solució 1. (Font pròpia)	41
Fig. 22 Lexium T Robot. (Schneider Electric, s.d.)	42
Fig. 23 Robot Diamant. (Font pròpia)	43
Fig. 24 Sistema de politges proposat. (Font Pròpia)	44
Fig. 25 Eixos de referència i variables del robot diamant.(Font pròpia)	46
Fig. 26 Velocitats del sistema de diamant (Font pròpia)	50
Fig. 27 Forces estàtiques sobre el sistema diamant	51
Fig. 28 Forces dinàmiques sobre el sistema diamant	53
Fig. 29 Rang de les coordenades (Font pròpia)	54
Fig. 30 planta connector mascle (Font pròpia)	54
Fig. 31 Zones de treball del sistema, cotes en mm. (Font pròpia)	56
Fig. 32 Vista en planta amb la terminologia del sistema. (Font pròpia)	57
Fig. 33 Espai acotat per el rang d'actuadors. (Font pròpia)	59

Fig. 34 Condicions inicials del dimensionament (Font pròpia)	60
Fig. 35 Dimensionament final i posició de repòs (Font pròpia)	61
Fig. 36 Motor pas a pas BRS3. (Schneider Electric, s.d.)	64
Fig. 37 Movinor LN. (Infranor, 2021)	65
Fig. 38 Descentrament de la força de connexió.(Font pròpia)	66
Fig. 39 Descentrament i desalineament de la Força de connexió (Font pròpia)	66
Fig. 40 Zones dels perfils de corretges ZR. (Optibelt, s.d.)	67
Fig. 41 Rodaments interiors a la polítila de l'articulació del colze. (Font pròpia)	68
Fig. 42 Secció en planta del disseny final, sistema de polítilges.(Font pròpia)	69
Fig. 43 Secció alçat, acoblaments flexibles i suports auxiliars superiors.(Font pròpia)	70
Fig. 44 Secció vista alçat, acoblament flexible i suport actuator inferior. (Font Propia)	71
Fig. 45 Acoblament flexible Oldham. (HUCO, s.d.)	71
Fig. 46 Suport auxiliar superior. (Font Pròpia)	73
Fig. 47 suport auxiliar inferior. (font pròpia)	74
Fig. 48 Vistes isomètriques anterior (esquerra) i posterior (dreta) de l'assemblatge de la base. (Font pròpia)	75
Fig. 49 Passador acanalat DIN 1473. (Font pròpia)	76
Fig. 50 Secció alçat articulació fixe braç complex (Font pròpia)	77
Fig. 51 Planta dimensions ranures base superior. (Font pròpia)	78
Fig. 52 Secció vista lateral passadors (Font pròpia)	79
Fig. 53 Rodament superior 22. (Font pròpia)	80
Fig. 54 Secció alçat rodament inferior 23. (Font pròpia)	81
Fig. 55 Secció alçat rodaments eix/roda. (Font pròpia)	82
Fig. 56 Vista isomètrica de la roda de l'articulació fixe. (Font pròpia)	83
Fig. 57 Braç proximal complex (Font pròpia)	84
Fig. 58 Vista posterior (superior) i anterior (inferior). (Font pròpia)	85
Fig. 59 Secció alçat articulació del colze. (Font pròpia)	86
Fig. 60 Detall joc rodament superior (30). (font pròpia)	87
Fig. 61 Detall fixació axial rodament inferior (29). (Font pròpia)	88
Fig. 62 Detall parella rodaments i cadena de cotes. (Font pròpia)	89
Fig. 63 Vista isomètrica i paret restant de la roda del colze (Font pròpia)	90
Fig. 64 Vista isomètrica del braç distal complex . (Font pròpia)	91
Fig. 65 Vista isomètrica tensor mà. (Font pròpia)	92
Fig. 66 Vista Isomètrica Sistema θ_{min} . (Font pròpia)	93
Fig. 67 Disposició dels cargols del braç distal complex. (Font pròpia)	94
Fig. 68 Secció vista lateral esquerra del braç simple. (Font pròpia)	95
Fig. 69 Detalls superior (esquerra) i inferior (dreta) dels rodaments. (Font pròpia)	96
Fig. 70 Detall colze simple. (Font pròpia)	97
Fig. 71 Vista isomètrica del braç simple. (font pròpia)	97
Fig. 72 Vista lateral articulació mà. (Font pròpia)	99

<i>Fig. 73 Detall bloqueig gir. (Font pròpia)</i>	99
<i>Fig. 74 Detall rodament inferior. (Font pròpia)</i>	101
<i>Fig. 75 Detall rodament superior. (Font pròpia)</i>	102
<i>Fig. 76 Detall ajust pista interior. (Font pròpia)</i>	102
<i>Fig. 77 Detall sortint inferior circular. (Font pròpia)</i>	104
<i>Fig. 78 Vista isomètrica del suport connector. (Font pròpia)</i>	104
<i>Fig. 79 Posicionament axial del conjunt mà (Font pròpia)</i>	105
<i>Fig. 80 Condicions distanciador inferior mà (Font pròpia)</i>	108
<i>Fig. 81 Ressalt roda inferior. (Font pròpia)</i>	109
<i>Fig. 82 Cotes conjunt mà. (Font pròpia)</i>	110
<i>Fig. 83 Fixació politja. (Font pròpia)</i>	112
<i>Fig. 84 Requeriments de les pestanyes de politges síncrones. (Optibelt, s.d.)</i>	113

Índex de taules

<i>Taula 1. Ventes anuals de carretes dels últims anys. (Medea, 2021)</i>	19
<i>Taula 2 Característiques carretes elèctriques EFG. (Jungheinrich, s.d.)</i>	21
<i>Taula 3 Especificacions del projecte</i>	36
<i>Taula 4 Dimensions corretges ZR seleccionades.</i>	69
<i>Taula 5 Toleràncies segons ISO 2768.</i>	106
<i>Taula 6 Necessitats rodaments. (Font pròpia)</i>	106

1. Introducció

En les últimes dècades la població està més conscienciada amb les energies alternatives degut a les visibles conseqüències del canvi climàtic. En la situació actual estam veient un canvi gradual en els consumidors vers a les energies renovables.

Els vehicles de combustió aviat seran història, convertint-se en primer lloc en híbrids i posteriorment en totalment elèctrics. En el món industrial les tendències son les mateixes i això genera una demanda creixent de noves tecnologies perifèriques al voltant d'aquest sector.

La inversió en el món del vehicle elèctric passa per millorar la autonomia , la eficiència en la càrrega i la implementació de nous sistemes que facilitin i millorin la connexió a la xarxa, tant en la via pública, en un pàrquing o en entorns industrials.

Actualment, en la indústria, aquests sistemes de connexió normalment comporten un temps improductiu de recàrrega. La reducció d'aquest període incrementa la disponibilitat del vehicle, la eficiència del treballador y com a conseqüència un major rendiment en la realització del treball.

En aquest projecte es pretén buscar una solució alternativa i automatitzada pel sistema de connexió a l'alimentació de la bateria del vehicles elèctrics pertanyents al món de la indústria que afegeixi valor en l'ús d'aquestes eines de treball.

Per a fer-ho, la metodologia emprada, ha sigut la definició de les especificacions del disseny per mitjà de el anàlisis dels vehicles elèctrics industrials existents en el mercat actual i la posterior etapa de disseny, tenint en ment les solucions aplicades en altres camps de l'automatització. Al llarg del projecte s'han consultat diferents tipus de fonts, des de literatura acadèmica fins a catàlegs de una ample varietat de productes.

El programa utilitzat per a realitzar el disseny ha estat SolidWorks.

El programa de càlcul utilitzat ha estat MatLab amb el recolzament de PAM (Programa d'anàlisi de Mecanismes).

1.1 Objectius del projecte

L'objectiu principal d'aquest projecte es dissenyar un prototip d'un sistema de connexió automàtic per a vehicles elèctrics del món industrial.

Per a complir aquest objectiu principal es pot desglossar en el següents objectius específics del projecte que permeten simplificar i ordenar les tasques a realitzar per aconseguir el resultat desitjat.

- Analitzar el protocol actual utilitzat i les diferents estratègies per a la connexió de les bateries de vehicles elèctrics industrials a la xarxa elèctrica o alimentació per a la seva recàrrega.
- Estudiar les solucions i tecnologies actuals que s'ofereixen en altres camps de l'automatització de processos, aprofundint en aquelles específiques per a la càrrega de vehicles elèctrics.
- Analitzar les característiques dels vehicles elèctrics industrials i les seves bateries.
- Acotar les especificacions del sistema de càrrega a dissenyar.
- Presentar una solució conceptual que s'adeqüi a les especificacions definides anteriorment.
- Transformar la solució conceptual en una solució tangible.
- Validar el disseny per mitjà de càlculs i anàlisis.
- Emetre la documentació per a la fabricació del disseny.

1.2 Abast

En aquest projecte s'analitzaran i estudiaran els tipus de tecnologies que poden ser vàlides pel compliment de l'objectiu principal: dissenyar el prototip d'un sistema de connexió automàtic per a vehicles elèctrics industrials.

Considerant les solucions trobades i definint les especificacions del projecte, per mitjà de l'estudi dels vehicles elèctrics industrials existents en el mercat, es dissenyarà de manera conceptual el sistema complet esmentat, justificant les diferents parts i tecnologies utilitzades en cada una d'elles.

Més enllà del disseny conceptual, el projecte es centrarà en materialitzar la part mecànica que s'ha definit anteriorment. Durant la materialització d'aquest disseny es buscarà complir les especificacions del mecanisme en el pla horitzontal obviant els moviments forà d'aquest pla.

Un vegada obtingut el disseny final del prototip, es comprovarà la seva validesa en termes de càrregues, precisió i funcionalitat de les parts que es considerin més rellevants. També s'inclourà unes anàlisis de l'impacte econòmic i ambiental del projecte.

Finalment es crearà la documentació necessària per a la compra dels components i la fabricació de les peces.

A l'apartat de conclusions s'esmentaran les possibles etapes futures de disseny que estan fora de l'abast del projecte actual.

2. Estat de l'art

En aquest apartat s'ofereix informació respecte al tema del projecte i s'investiga sobre les tecnologies existents actualment que resolen problemes semblants en que es centra aquest treball.

2.1 Vehicles elèctrics a la indústria

Poc a poc els vehicles elèctrics van substituint als de combustió en la nostra vida quotidiana, però en el àmbit industrial on les feines no es realitzen a l'aire lliure, els vehicles elèctrics fa molt temps que hi son implantats. En moltes de les naus industrials d'emmagatzematge o de producció s'hi poden trobar vehicles elèctrics que faciliten la feina als treballadors i augmenten la productivitat generant beneficis. (Miranda & Iglesias, 2015)

Tot i que cada cop més, aquets vehicles es controlen automàticament sense necessitat de un operari, es inevitable que a dia d'avui algunes funcions requereixin de la acció humana per a poder-les dur a terme. És per això que actualment hi ha una convivència entre operaris i robots en la indústria.

Un punt en comú que tenen tots els vehicles elèctrics, que son autònoms, son les bateries. Aquestes subministren energia pels motors i pels sistemes que realitzen les diferents funcions. La tecnologia de les bateries ha anat millorant al llarg dels últims anys, aconseguint així, temps de funcionament mes llargs i cicles de carrega mes curts. Però encara el procés de carrega continua sent un dels passos necessaris per a la utilització d'aquests vehicles autònoms. (Battery University, 2020)

En vehicles no tripulats, existeixen estacions de càrrega a les que els robots s'acoblen automàticament quan estan en repòs o quan detecten que els nivells de energia de la bateria son baixos. Però els vehicles que requereixen del control d'un treballador, com per exemple les carretes elevadores, també requereixen que l'operari els situï a la estació de carrega i endolli la bateria del vehicle al sistema d'alimentació, seguint el protocol i tenint en compte les mesures de seguretat corresponents.

Aquest procés de connexió per a la carrega del vehicle es realitza mes o menys vegades depenent de la estratègia a seguir a l'hora de fer-lo servir. L'estratègia convencional de l'ús consisteix en utilitzar el vehicle durant 6/7hores, fins que la bateria queda gairebé esgotada.

Seguidament, es realitza la càrrega total de la bateria que es un procés que dura 8/10h. Finalment la bateria necessita de un període de refredament abans de començar a utilitzar el vehicle de nou. També existeix una estratègia per vehicles que s'utilitzen en feines puntuals, que no es duen a terme al llarg de tot un torn. En aquest cas, el vehicle es carrega quan es té oportunitat i això implica que el procés de carrega es realitza varies vegades en un mateix dia.

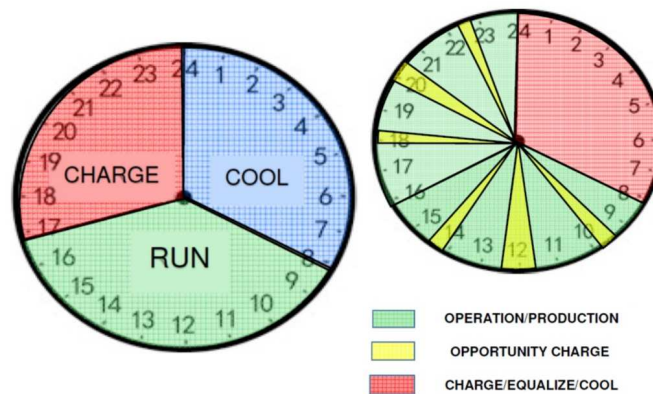


Fig. 1 Estratègies de càrrega per a vehicles elèctric industrials. (Toyota, s.d.)

Un altre tipus de estratègia és el canvi de bateria, quan una bateria s'esgota s'intercanvia per una altre ja carregada. Òbviament aquesta estratègia implica una inversió inicial més elevada, per a la compra de una bateria addicional però en contrapartida implica que el vehicle es pot utilitzar gairebé de manera contínua.

En aquesta segona estratègia, el temps que l'operari inverteix en seguir el protocol per a connectar la bateria a la alimentació, al final del dia pot afectar tant a la carrega del vehicle com a la productivitat de l'operari. (Toyota, s.d.)

2.2 Procés de carrega en vehicles elèctrics

Degut a la creixent aparició de instruments i vehicles elèctrics autònoms, s'han realitzat nombrosos projectes amb la intenció de facilitar i automatitzar el procés de càrrega. En aquest apartat es comentaran algunes de les innovacions que han aparegut al llarg dels últims anys, que busquen facilitar el procés de carrega de les bateries.

Una part de les solucions existents aprofiten la conducció autònoma, de la qual alguns vehicles avui en dia ja disposen, per a realitzar la connexió amb l'estació de càrrega. En l'article "Autonomous docking based on infrared system for electric vehicle charging in urban areas" (Pérez, Nashashibi, Lafeudeux, Resende, & Pollard, 2013) es presenta una solució a la càrrega

de vehicles elèctrics en zones urbanes. Aquesta solució considera que el connector femella del vehicle esta col·locat a la part frontal i a una alçada constant del terra, mentre que l'estació de càrrega disposa del connector mascle a l'extrem d'un braç automatitzat a la mateixa alçada que la del vehicle. Per a dur a terme l'acoblament entre les dues parts del connector, els autors proposen que el vehicle sigui aparcat a pocs metres de l'estació i que sigui la conducció autònoma del vehicle la que realitzi l'aproximació cap a l'estació de càrrega. Per mitjà d'anàlisis de imatge amb una càmera instal·lada a la part frontal del vehicle i la conducció autònoma fa l'aproximació fins a una zona d'acoblament. Un cop el vehicle arriba al punt d'acoblament és el braç automatitzat el que finalment realitza la connexió entre les dues parts per iniciar el procés de càrrega del vehicle.

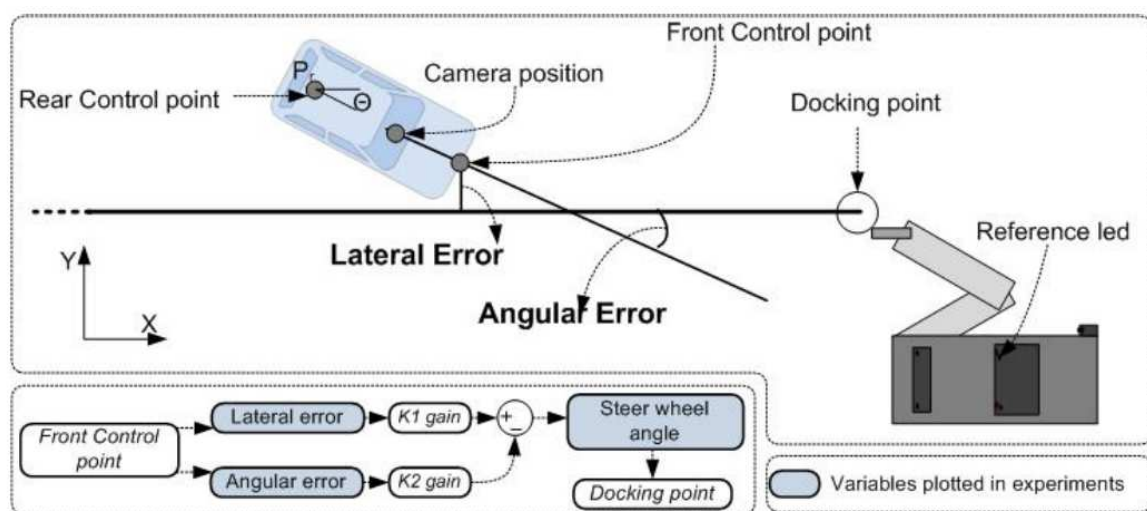


Fig. 2 Definició del control per l'acoblament automàtic del vehicle. (Pérez, Nashashibi, Lafeudef, Resende, & Pollard, 2013)

Finalment, amb el laaç de control dissenyat, aconseguen que el vehicle arribi al punt d'acoblament amb un error mig lateral i longitudinal de 24.7 mm i 9.61 mm respectivament considerant que el vehicle ha estat estacionat aproximadament a 5000 mm longitudinals del punt d'acoblament.

Per altre banda grans empreses com Siemens, ABB o Endesa, que aposten per la mobilitat elèctrica, han desenvolupat solucions per a la càrrega de oportunitat d'autobusos elèctrics. El que es proposa en aquestes solucions es la càrrega del vehicle mentre aquest esta estacionat a la parada d'autobús. Aquesta solució constaria d'una estació d'autobús que disposa d'una columna amb una part horitzontal superior sota la que s'haurà d'estacionar l'autobús. Un cop aquest esta estacionat a la part inferior dins d'un possible rang, s'estén un pantògraf des de la part superior de l'autobús o des de la part horitzontal de la columna que realitza l'acoblament per a iniciar la càrrega del vehicle. (ABB, s.d.)



Fig. 3 Estació de càrrega autobús elèctric pantògraf avall. (ABB, s.d.)

Aquesta solució ja ha estat implementada amb èxit en algunes ciutats europees com per exemple Estocolm o Barcelona. (Endesa, 2019)

Ideanamics, una companyia d'Estat Units, ha desenvolupat la tecnologia WAVE per a la recàrrega d'autobusos elèctrics que no requereix cap tipus de connexió per mitjà de cables entre el vehicle i l'estació. Aquesta estació de càrrega per mitja del principi d'inducció carrega la bateria del vehicle quan aquest estaciona sobre la placa de càrrega. (Ideanamics, s.d.)

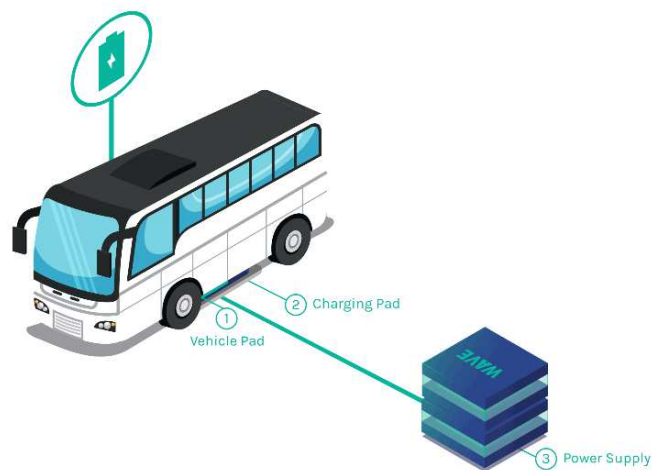


Fig. 4 Estructura del sistema WAVE. (Ideanamics, s.d.)

Finalment, el projecte més actual en aquest camp, està sent desenvolupat per l'empresa Volkswagen. El desembre de 2020 la companyia va pujar en el seu canal de Youtube un vídeo de un robot completament autònom capaç de carregar els vehicles elèctrics estacionats.

Aquest sistema es basaria en la recarrega de bateries de vehicles elèctrics en pàrquings. Un cop el cotxe esta estacionat en una de les places, si el client ho vol pot activar el servei de recàrrega. Quan aquest servei es sol·licitat, el robot autònom desendolla una de les bateries externes de la seva estació de càrrega i la porta fins a la plaça del vehicle elèctric que ha sol·licitat el servei i connecta la bateria externa al vehicle. Un cop el vehicle esta completament carregat o quan el client ho vulgui, el robot autònom tornarà a recollir la bateria externa per a retornar-la a la seva estació de càrrega. (Volkswagen, 2019)



Fig. 5 (Esquerra) Estació de càrrega de bateries externes, (Dreta) Connexió al vehicle. (Volkswagen, 2019)

Aquest sistema te com a avantatge que amb un únic robot autònom es pot gestionar la càrrega de tants vehicles elèctrics com bateries elèctriques es disposin.

Tot i així aquest és un sistema que encara esta en desenvolupament per part de la companyia.

2.3 Viabilitat del projecte

En aquest apartat es discuteix la viabilitat del projecte pel que fa referència a les tecnologies existents en la indústria actual, tant com els avantatges que pot presentar respecte els mètodes de càrrega de vehicles elèctrics actuals a la indústria.

Anys enrere, l'automatització que es tracta en aquest projecte, hagués estat un procés difícil i costós, per la manca de precisió i comunicació entre les diferents eines de una nau industrial. Però en la actualitat, amb la indústria 4.0, la automatització de processos complexos és possible gràcies a la comunicació entre les eines intel·ligents que formen part d'una cadena de muntatge o un magatzem.

La automatització de processos ha estat una constant en el món industrial des de la seva

aparició, augmentant així la eficiència i productivitat de una gran quantitat de processos que fins aleshores eren duts a terme per operaris.

Amb la entrada de la indústria 4.0 a les naus i magatzems, gran part de la maquinaria i instrumentació que trobem dins de la indústria, té protocols de comunicació a través de internet o xarxes internes, el que permet tenir coneixement i un control precís de totes les accions que s'estan realitzant en el procés de fabricació o tots els moviments que s'estan realitzant en el magatzem de producte. (Quintana, 2021)

El projecte tracta de desenvolupar un sistema capaç d'automatitzar el procés de connexió i desconexió de la font d'alimentació per a la recarrega de les bateries de vehicles elèctrics industrials. La part del sistema a càrrec del moviment estarà formada per actuadors i enllaços mecànics i haurà de tenir una certa precisió en el posicionament dels graus de llibertat, que estarà acotada per les toleràncies del connector utilitzat. També caldrà tenir en compte el reconeixement de la posició del vehicle relatiu al sistema, per això caldrà considerar les possibles solucions que existeixen en el mercat actual per escollir la que més s'adapti al nostre projecte. En l'apartat "Estat de l'art" ja s'ha pogut veure que existeixen solucions en camps semblants al que es vol abordar en aquest projecte i que les tecnologies actuals tenen prestacions suficients.

En el mercat existeixen productes com robots cartesianes utilitzats en impressores 3D, robots Delta que s'utilitzen en la indústria per fer operacions de *Pick and place* (Schneider Electric, s.d.) o inclús braços robòtics que es poden personalitzar amb el nombre d'actuadors i articulacions que es requereixin i amb els que s'obtenen errors de posicionament inferiors a 1mm (Igus, s.d.). en aquest projecte, però es buscarà i desenvoluparà un sistema específic i optimitzat per el cas que s'està tractant.



Fig. 6 Braç robot de Igus, Robolink RL-DP. (Igus, s.d.)

Es per això que es creu que, amb aquestes tecnologies ja presents i ben desenvolupades en el món industrial, és possible el realitzar aquest projecte aprofitant alguns productes que ofereix el mercat actual.

Per que fa referència els avantatges que pot oferir el sistema, cal tenir en compte el context actual pel que fa als vehicles elèctrics.

En els últims anys la indústria dels vehicles elèctrics i la inversió en aquest camp ha crescut considerablement. Aquest increment en la inversió, ha fet millorar les tecnologies de les bateries d'aquest vehicles i de les seves estacions de càrrega, fins al punt d'aconseguir càrregues del 80% de la bateria en temps inferiors als 30 minuts en l'any 2017. (Li, 2019)

Aquesta millora de les prestacions del vehicles elèctrics també inclou els que són industrials, i això es tradueix en un increment en la bretxa de la venda de carretes elevadores elèctriques respecte a les de combustió.

VENTAS DE CARRETILLAS EN LOS ULTIMOS AÑOS										
	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011
TERMICAS	1.520	2.549	2.930	2.363	2.483	2.002	1.427	1.257	1.151	1.319
ELECTRICAS	5.320	7.299	7.963	6.966	5.890	5.134	3.462	3.090	2.952	3.087
CONTRAPESADAS	6.840	9.848	10.893	9.329	8.373	7.136	4.889	4.347	4.103	4.406
Interiores Conductor Acompañante	15.790	17.741	17.757	16.803	13.431	11.880	9.149	7.492	8.120	7.670
Interiores Conductor Sentado	1.912	2.292	2.413	2.208	1.489	1.352	1.076	812	834	998
Tractores	41	122	80	257	296	220	249	86	104	111
INTERIORES	17.743	20.155	20.250	19.268	15.216	13.452	10.474	8.390	9.058	8.779
TOTAL INDUSTRIAL	24.583	30.003	31.143	28.597	23.589	20.588	15.363	12.737	13.131	13.185

Taula 1. Ventas anuals de carretes dels últims anys. (Medea, 2021)

Aquesta millora en les estacions de càrrega i les bateries permet als vehicles industrials seguir l'estratègia *opportunity charging* presentada a l'apartat "2.1 Vehicles elèctrics a la indústria" de manera més segura, ja que amb temps curts s'aconsegueixen alts nivells de càrrega. Cal tenir en compte doncs, que en aquesta estratègia es connecta i desconnecta el vehicle de l'alimentació tantes vegades com aquest es deixi d'utilitzar. Això pot representar una pèrdua de temps per la part de l'operari i també del temps que el vehicle elèctric no està connectat a l'alimentació.

Per tant el sistema que es proposa, evitaria que l'operari gastés temps en tasques que no afegeixen valor i permetria que el vehicle estigués més temps connectat a l'alimentació.

3. Anàlisis del concepte

Per a poder definir les especificacions del projecte, primer caldrà escollir el vehicle industrial de manera més concreta per a conèixer les seves dades.

El vehicle escollit per aquest projecte es un dels més utilitzats en l'àmbit industrial. La carreta elevadora és un vehicle industrial habitualment elèctric, si s'utilitza dins de naus industrials. Es poden trobar models de 3 o 4 rodes i aquest vehicle disposa de dues pales a la seva part frontal les quals utilitza per a transportar palets, contenidors i altres tipus de carreges.

Gràcies a un sistema de pistó hidràulic, aquest vehicle es capaç d'eleva la forquilla a gran alçada per tal de desar o recollir la carrega de les estanteries del magatzem. Per a poder subjectar la carrega a la part frontal sense perdre el contacte de les rodes amb el terra, el vehicle te situat gran part del seu pes com la bateria i a vegades carrega addicional a la part del darrere per tal que actuï com un contrapès.

Les carretes elevadores tenen dues rodes a la part davantera que habitualment és l'eix motriu, i una o dues rodes a l'eix del darrere que es el directriu. L'eix directriu esta dotat d'un gran angle de gir que permet realitzar maniobres en espais estrets i aconseguir grans precisions.



Fig. 7 Parts de la carreta elevador elèctrica. Font (Toyota, 2017).

La tecnologia de les bateries ha canviat al llarg dels últims anys,. Anys enrere les bateries que predominaven al mercat eren les de plom, però a finals del segle XX es van buscar alternatives

més eficients i optimitzades per al nombre creixent de aparells que requerien aquestes bateries, donant amb altres solucions com les de ions de liti o les de polímer de liti. Aquest tipus de bateries tenen un gran nombre d'avantatges respecte a les seves predecessores, com per exemple una densitat energètica més gran, vides útils superiors, temps de carrega reduïts i menys pèrdues tèrmiques. (Battery University, 2020)

En el mercat existeixen diferents empreses fabricants de carretes elevadores elèctriques, com per exemple CAT, Jungheinrich, Toyota, etc. Després d'analitzar el catàleg d'aquests fabricants, s'ha considerat que el fabricant que ofereix una informació més extensa sobre els seus productes i per tant facilitarà el fet de trobar informació per desenvolupar el disseny es Jungheinrich. Es per això que s'escollirà el vehicle de referència entre un dels models del seu catàleg.

La Jungheinrich ofereix cinc varietats de carretes elevadores elèctriques en funció de la carrega a transportar en tones i a l'alçada a assolir de la forquilla.

Codi producte	Rang de càrrega (Tones)	Alçada assolible (metres)
EFG 110-115	1 - 1,5	2,3 - 6,5
EFG 213-220	1,3 - 2	2,9 - 6,5
EFG 316-320	1,6 - 2	2,9 - 6,5
EFG 425-S30	2,5 - 3	2,9 - 7,5
EFG 535-S50	3,5 - 5	2,48 - 7,5

Taula 2 Característiques carretes elèctriques EFG. (Jungheinrich, s.d.)

El primer model disposa de una única roda a la part posterior, el segon disposa de dues rodes al centre de la part posterior i la resta disposa de dues rodes als laterals de la part posterior.

Per a definir les especificacions del projecte s'ha escollit el model EFG 216 i per tant caldrà entendre quin es el protocol que ha de realitzar l'operari per connectar la bateria del vehicle a l'alimentació.

Tots els vehicles del model EFG disposen de la bateria de ions de liti situada sota el seient del conductor a la qual s'hi pot accedir obrint una porta al lateral de la carrosseria. Quan el vehicle esta en funcionament, la bateria de liti es troba connectada al sistema. Quan es desitja carregar la bateria, s'ha d'estacionar la carreta a la zona de càrrega. Un cop situat a la zona, cal apagar el vehicle, obrir la porta de la bateria i desconnectar-la del sistema per endollar-la al connector de la alimentació. Un cop connectat només caldrà encendre la alimentació. (Jungheinrich, s.d.)

Per a desconnectar l'únic que s'ha de fer es apagar la alimentació y desconnectar la bateria per

a tornar a connectar-la al sistema de la carreta elevadora.

Del protocol actual de carrega podem entendre que per a connectar la bateria al sistema d'alimentació tots els sistemes del vehicle han de estar completament apagats i aïllats de la bateria. Això impedeix aprofitar el moviment del vehicle per a realitzar la connexió, ja que per a fer-ho la carreta haurà d'estar completament aturada.

Per a realitzar la connexió de maner automàtica, el cablejat situat darrera de la porta haurà de tenir una sortida a la part exterior del vehicle per a que el sistema pugui realitzar la connexió sense que el operari hagi de realitzar cap més acció apart de situar el vehicle a la zona de càrrega.

Per a escollir la posició de la part del connector del vehicle cal tenir en compte la situació de la bateria, que està sota el seient i s'accedeix per el lateral. Entre la bateria i la part posterior del vehicle hi estan situats els sistemes de direcció y control del vehicle el que impossibilita situar el connector a la part posterior sense haver de realitzar grans canvis en el model. La bateria descansa sobre el bastidor del vehicle. Aquest bastidor es una xapa d'acer soldada de 15 mm de gruix i es una part important de la estructura del vehicle, per tant qualsevol modificació a aquesta xapa podria afectar a la integritat estructural d'aquest.



Fig. 8 Carreta elèctrica elevadora EFG 213-220. (Jungheinrich, s.d.)

Un cop descartades les parts posteriors i inferiors del vehicle, únicament queda considerar la part lateral. Aquesta part disposa de una porta amb fàcil accés a la bateria que ha estat dissenyada per a poder realitzar canvis de bateria amb certa facilitat. La xapa d'acer plegat que forma la porta es de un gruix molt inferior al de la carrosseria ja que no esta dissenyada per a suportar càrregues, per tant modificar-la, no afectaria a la integritat estructural del vehicle.

Les modificacions a realitzar seran tant en el cablejat de la bateria, per tenir entrada i sortida de corrent diferents, com en la porta del vehicle per a poder realitzar les connexions sense obrir-la.

3.1 Coordenades per l'anàlisi

Un cop definida la posició del connector del vehicle, tenint en compte el funcionament de la carreta elevadora, podem establir el grau de llibertat que tindrà el sistema i d'aquesta manera escollir el nombre i tipologia dels actuadors i dels enllaços.

Suposant que el sistema tindrà un enllaç fix a una superfície que podria ser la paret, que utilitzarem com a referència, caldrà descobrir quins son els graus de llibertat que poden variar quan l'operari estaciona en la zona de carrega. Suposarem en tot moment que el terra es perpendicular a la superfície de referència. Però abans per facilitar la comprensió, cal definir uns eixos de coordenades cartesianes.

- Eix x: és l'eix paral·lel a la superfície de referència i a la superfície del terra.
- Eix y: serà definit com l'eix perpendicular a la superfície de referència on es fixarà el sistema.
- Eix z: es l'eix perpendicular al terra i en conseqüència, paral·lel a la superfície de referència.
- Angle α : angle definit per la rotació en l'eix z amb origen en l'eix x.
- Angle β : definit per la rotació en l'eix y amb origen en l'eix z.
- Angle γ : definit per la rotació en l'eix x amb origen en l'eix z.

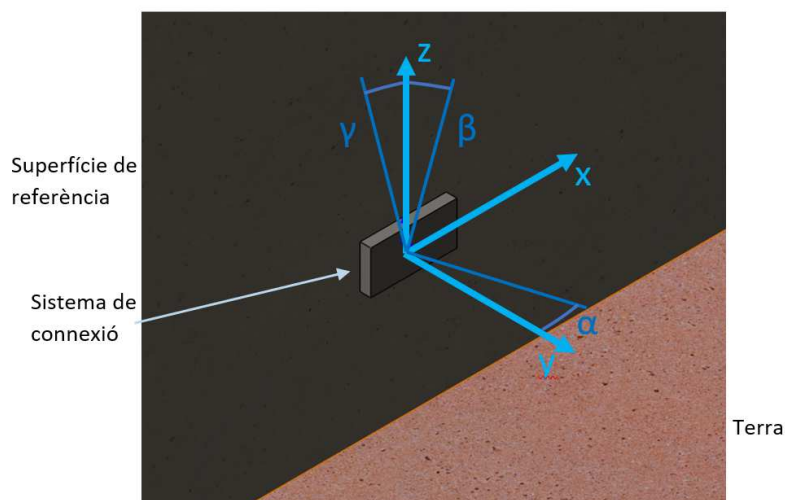


Fig. 9 Eixos de coordenades i angles del sistema. (Font pròpia)

Un cop definits els eixos de coordenades ja podrem referenciar la posició de la part del connector que hi ha instal·lada en el vehicle. Algunes d'aquestes coordenades seran diferents per a cada estacionament i per tant hauran d'estar controlades y actuades. En canvi altres coordenades seran fixes i només caldrà tenir en compte els seus valors a l'hora d'instal·lar el sistema.

Entre dos estacionaments diferents es pot veure que hi ha tres de les coordenades que canvien el seu valor, ja que depenen de com realitzi l'estacionament l'operari i per tant existeix una variabilitat degut a l'error humà. Aquestes 3 variables son x , y i α . La variable y serà la distancia perpendicular entre la superfície de referència i el centre del connector del vehicle, la variable x serà la distancia paral·lela a la superfície de referència i al terra des de l'origen fins al centre del connector de vehicle i finalment l'angle α queda definit com l'angle que existeix entre la perpendicular al pla de referència i la perpendicular al lateral del vehicle (ambdós plans perpendiculars al terra. En la figura X es poden apreciar aquestes tres variables amb una vista de pla en la situació de l'estacionament del vehicle a l'estació de càrrega.

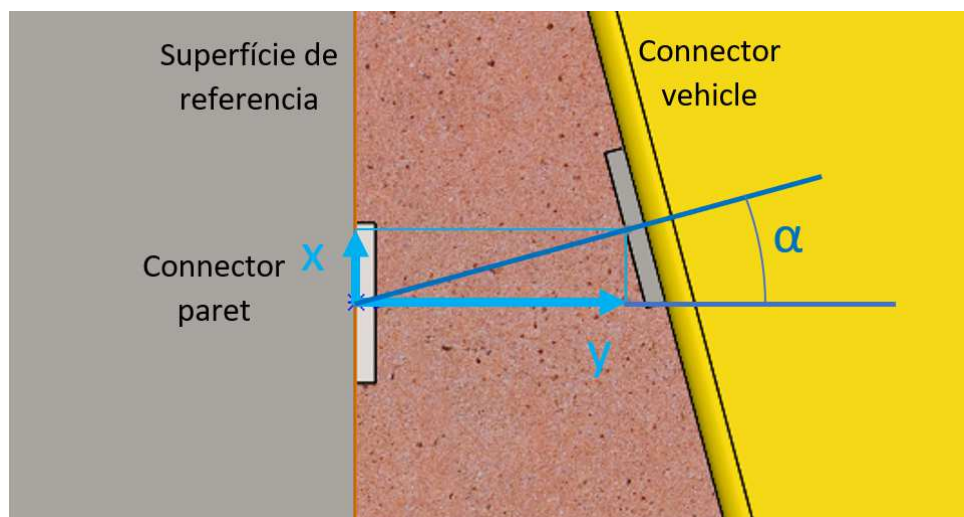


Fig. 10 Planta del vehicle estacionat a la zona de càrrega. (Font pròpia)

Aquestes tres variables requeriran de actuadors per a poder controlar els graus de llibertat dins de un cert rang.

Pel que fa les altres coordenades z , β i γ caldrà descobrir si poden arribar a variar el seu valor al llarg del temps i quines podrien ser les seves causes. Si finalment aquestes coordenades varien entre diferents estacionaments, caldrà situar-hi actuadors, si no és així, caldrà que el sistema de connexió tingui una certa elasticitat en aquestes coordenades fixes. Aquesta elasticitat permetrà al sistema funcionar correctament tot que hi hagin petits canvis no esperats en una de les

coordenades fixes i també permetrà tenir una certa tolerància a l'hora de fer la instal·lació inicial del sistema.

Per a la representació següent suposem l'origen de la coordenada z en el terra i definim l'alçada del sistema a la paret com Z_0 i l'alçada del connector del vehicle serà Z .

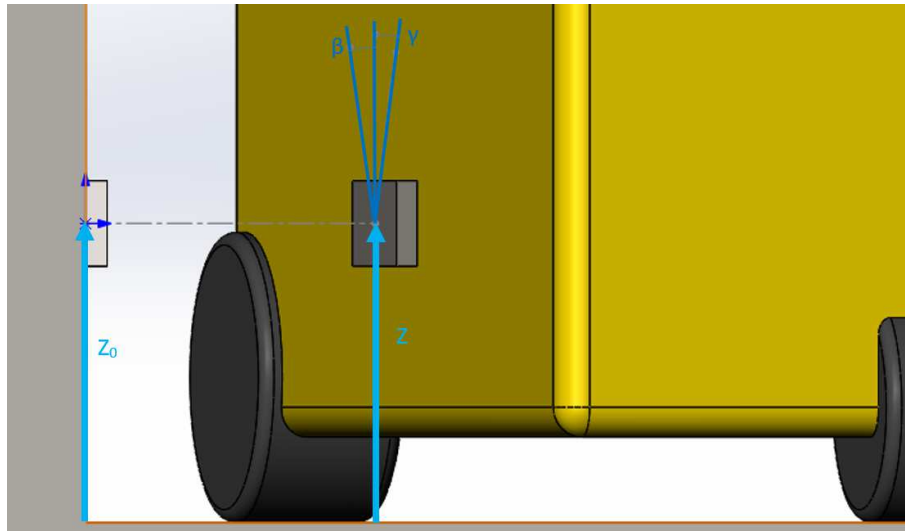


Fig. 11 Alçat del vehicle estacionat a la zona de càrrega. (Font pròpia)

Descartant que el vehicles vagin a la zona de estacionament portant cap tipus de càrrega a les forquilles, l'únic fenomen que pot afectar a l'alçada z i a les orientacions β i γ del connector del vehicle es el desgast produït en els pneumàtics degut al funcionament de les carretes.

3.2 Rang dels graus de llibertat

Per a calcular els rangs que els actuadors han de poder cobrir en aquestes coordenades, el procés més adequat seria recollir dades de estacionaments d'aquest tipus de vehicle per a poder extreure'n conclusions, però com no es disposa ni dels medis ni dels temps necessaris, s'estudiarà la geometria de una funció que fan totes les carretes elevadores i s'extrapolerà al nostre cas d'estudi.

Aquesta funció ben definida que fan aquest tipus de vehicles es la recollida i transport de palets. Tots els operaris estan capacitats per a realitzar aquesta tasca ja que es essencial i és un procés acotat per les dimensions de les forquilles i palets.

Existeixen palets de diferents mesures, però un dels models més utilitzats es l'europalet o EPAL

definit per la norma UNE-EN 13698-1. En la següent figura es mostren les mesures estandarditzades en mil·límetres.

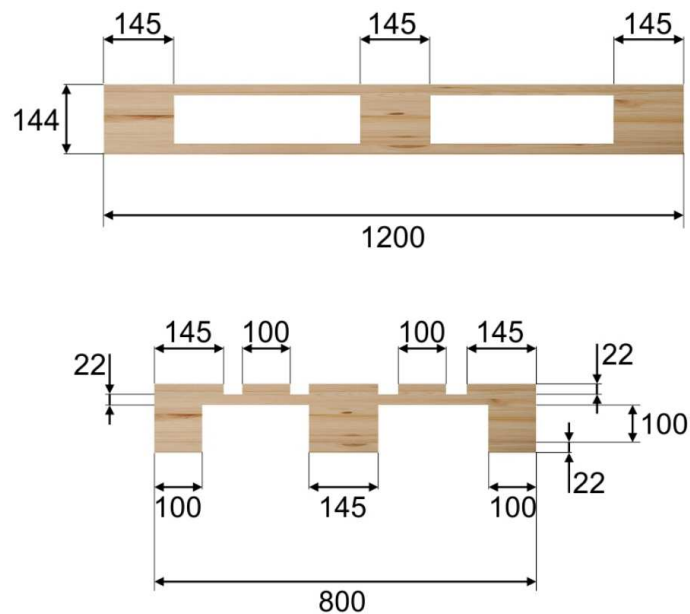


Fig. 12 Dimensions Europalet. (Esnova, 2019)

Amb aquestes mesures estandarditzades i les dimensions de les pales frontals del model de carreta elevadora, que es l'escollit com a referència per aquest estudi, es poden obtenir uns rangs de precisió mínims que ha de tenir l'operari per a recollir els palets. Aquests rangs es podran extrapol·lar al cas de l'estacionament per a conèixer la zona de treball del sistema en les coordenades x i y , i també conèixer l'amplitud de l'angle α .

En els catàlegs de la empresa fabricant de carretes Jungheinrich apareixen diferents mesures per a les pales frontals depenent la carrega que estiguin dissenyats per supurar, però unes dimensions mitjanes que podem utilitzar per fer càlculs son les mostrades en la següent figura. Aquestes dimensions estan representades en mil·límetres. (Jungheinrich, s.d.)

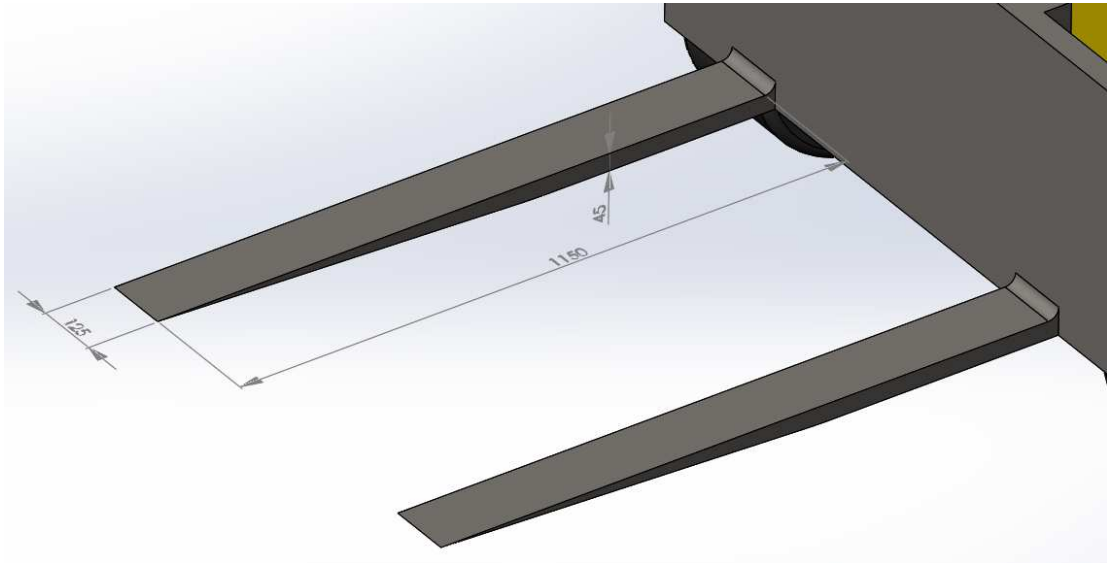


Fig. 13 Pala de la carreta elevadora. (Font pròpia)

De les dimensions estandarditzades del palet es pot descobrir el espai en el que hi haurà d'entrar cada una de les pales. Aquest espai té la llargada del palet i la seva amplada a es dedueix amb la expressió següent.

$$a = \frac{800 - 145 - 2 \cdot 100}{2} = 227,5 \text{ mm}, \quad L = 1200 \text{ mm} \quad (1)$$

Aquest serà un espai rectangular en el cap l'operari haurà de introduir la pala de la carreta elevadora, per tant el rang del que l'operari disposa vindrà donat per la següent expressió.

$$b = 227,5 - 125 = 102,5 \text{ mm} \quad (2)$$

Així doncs es pot suposar que l'operari tindrà aquesta precisió en la direcció perpendicular a la superfície de referència (coordenada y) on es troba situat el sistema de connexió automàtic.

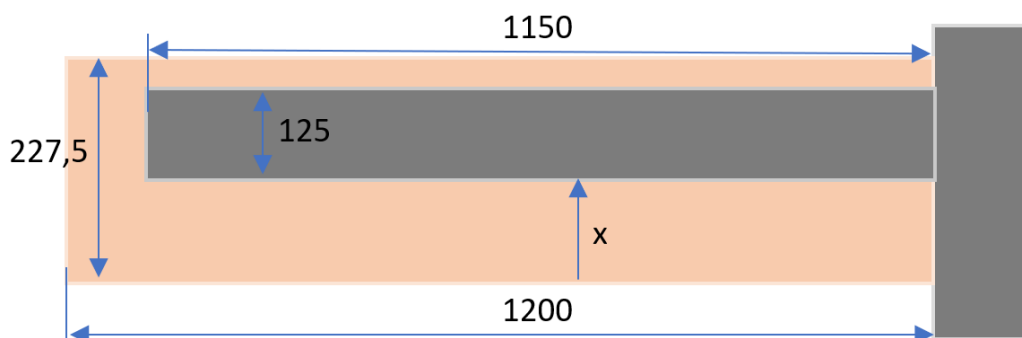


Fig. 14 Pala de la carreta dins el forat del Europalet. (Font pròpia)

Com es pot apreciar en la representació anterior, la pala de la carreta es mes curta que la llargada

de l'espai en el palet, per això el palet, durant el procés de recollida, fa contacte amb la superfície final. Això fa difícil realitzar un càlcul de la precisió en aquesta direcció, però degut al funcionament del vehicle, es pot considerar que la precisió en la direcció longitudinal es mes gran que en la altre dimensió. La disposició de les rodes en referència a la forquilla del vehicle permet realitzar moviments en la direcció longitudinal sense necessitat de maniobrar.

D'aquesta manera, suposant la mateixa precisió en les dues direccions es pot definir l'espai de treball en el pla xy del sistema de connexió. Per comoditat s'arrodoniran el valors a 105 mm.

$$x \in [x_0, x_0 + 105 \text{ mm}], \quad y \in [y_0, y_0 + 105 \text{ mm}] \quad (3)$$

Els valors x_0 i y_0 dependran de on es situï l'origen del centre de coordenades.

Per a realitzar el càlcul del rang de α , utilitzarem el mateix espai del palets i les mateixes dimensions de la pala, però en aquest cas es suposarà que la entrada de la pala a l'espai es fa en el màxim angle possible. La figura següent mostra un representació del cas.

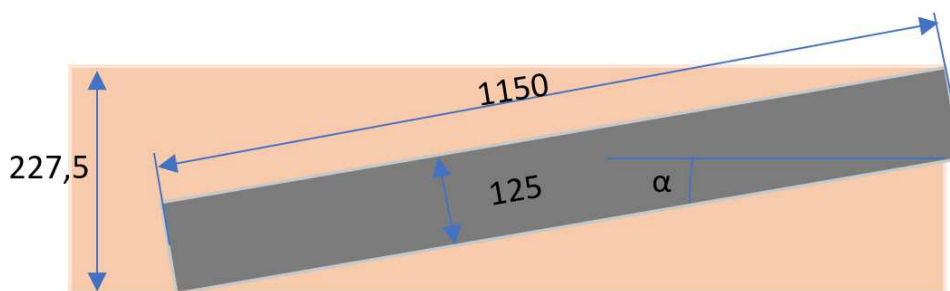


Fig. 15 Representació desviació angular pala dins del forat. Font Propia

En aquesta situació tenim l'angle α màxim entre la direcció horitzontal i la direcció longitudinal de la pala, i també entre la direcció vertical i la direcció transversal de la pala, per tant de la expressió següent podem aïllar el valor de α_{max} .

$$227,5 = 1150 \cdot \sin(\alpha_{max}) + 125 \cdot \cos(\alpha_{max}) \quad (4)$$

$$\alpha_{max} = 5,14^\circ$$

Degut a que α pot variar en les dues direccions, el rang d'aquesta coordenada que s'haurà de considerar es el doble del valor màxim.

$$\alpha \in [-5,14^\circ; 5,14^\circ] \quad (5)$$

D'aquesta manera ja tenim acotades les 3 coordenades x , y i z . Per tant la zona de treball del sistema de connexió haurà de complir aquestes especificacions per aquestes variables.

3.3 Rang de coordenades

Tal com s'ha comentat anteriorment, l'únic fenomen que té un impacte significatiu sobre la variació d'aquestes coordenades entre diferents estacionaments del vehicle és el desgast de les rodes.

Els fabricants de neumàtics d'aquest vehicles afirmen que la vida útil d'aquests, en la qual el vehicle no perd prestacions significativament, ve delimitada per una línia anomenada línia de desgast que aproximadament representa la pèrdua de un 20% del diàmetre del neumàtic (depenent del tipus de neumàtic utilitzat). Aquesta reducció del diàmetre del neumàtic pot tenir un impacte en les coordenades. (Hodge, 2021)

Per a la coordenada z aquesta reducció del diàmetre dels neumàtics implica una caiguda de la alçada gradual. Per a trobar el rang en el que es trobarà aquesta coordenada, es calcularà la reducció del diàmetre dels neumàtics més grans del vehicle, que són els de l'eix del davant. Per a fer aquest càlcul es podria tenir en compte que els neumàtics anteriors i posteriors són de diàmetres diferents, però això implicaria conèixer a quina distància es troba el connector del vehicle de cada eix, i a més tenir en compte la roda més gran del vehicle, que és la situació més desfavorable.

Del full de dades del model EFG 216 de Jungheinrich s'obté que les rodes de l'eix posterior tenen el codi 18x7-8. En els neumàtics d'aquests tipus de vehicles els codis marquen el diàmetre interior del neumàtic i l'amplada d'aquest, però el diàmetre exterior varia depenent del tipus de neumàtic utilitzat. El fabricant especialitzat en neumàtics per a vehicles industrials GRI ofereix neumàtics de dimensions 18x7-8 amb diàmetres exteriors que varien entre 451 i 453 mm, per tant, altre vegada es suposarà la situació més desfavorable, considerant el diàmetre exterior més gran. Així doncs el rang de z ve donat per la següent expressió.

$$\Delta h = d_{ext} \cdot 0,2 = 453 \text{ mm} \cdot 0,2 = 45,3 \text{ mm}$$

$$z \in [z_0, z_0 + 45,3 \text{ mm}] \quad (6)$$

On z_0 vindrà donat per la posició de l'origen de coordenades.

Aquest valor trobat per al rang de z no es un valor menyspreable, que es pugui solucionar

introduint elasticitat al sistema. Per tant la coordenada z també haurà de comptar amb una actuador que variï la seva posició. També cal tenir en compte que aquesta coordenada variarà molt lentament. Això implica que aquest grau de llibertat no canviarà per a cada estacionament com x , y i α , si no que ho farà quan el desgast de la roda hagi produït un canvi d'alçada significatiu, serà a les hores quan s'haurà d'activar aquest actuador de z que variarà la alçada del sistema a la nova alçada.

La variació de l'angle γ es donarà quan el desgast dels neumàtics anteriors i posteriors produeixin variacions d'alçada diferents a la part davantera i darrera del vehicle.

La diferència entre les mides dels neumàtics anteriors i posteriors es degut a que l'eix anterior es el motriu i que la carrega es transporta a la part frontal. Aquesta combinació resulta en que els neumàtics de l'eix anterior pateixen més desgast, d'aquesta manera col·locant-hi neumàtics amb diàmetres superiors, els quatre neumàtics arriben al final de la seva vida útil a la vegada. Es per això que tant els fabricants de neumàtics com els fabricants de carretes elevadores recomanen realitzar el canvi de tots els neumàtics del vehicle a la vegada.

Tot i així, al llarg del desgast de les rodes l'angle γ va canviant progressivament degut a la diferència de mida entre les rodes.

En la carreta EFG 216 les dimensions de les rodes del davant son 18x7-8 en el que s'obté un diàmetre exterior de 453 mm i les dimensions de les rodes del darrere son 140/55-9 les quals tenen un diàmetre de 375 mm. Per a realitzar els càlculs també es necessari conèixer la distància entre eixos del model, que segons el catàleg es de 1465 mm. En la següent figura es mostren les situacions de l'angle γ en la situació inicial $\gamma=0$ a l'esquerra i en la situació de desgast a la dreta.

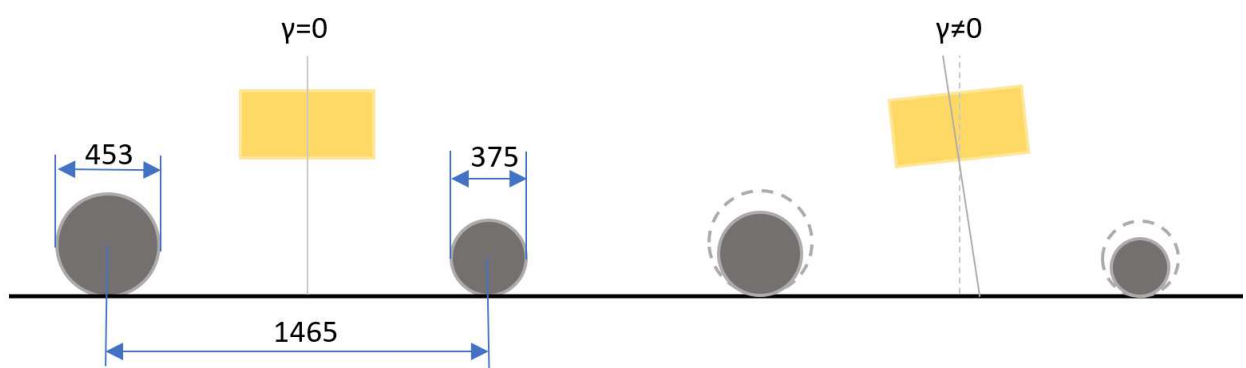


Fig. 16 Representació de la inclinació de la carreta per desgast de les rodes.

L'angle γ serà el màxim quan els neumàtics hagin patit el desgast màxim, en aquesta segona situació els diàmetres exteriors de les rodes s'han reduït en un 20%. Entre la primera i segona situació es manté constant la distància entre eixos que ve donada per l'expressió:

$$d = \sqrt{1465^2 + \left(\frac{453 - 375}{2}\right)^2} = 1465,62 \text{ mm} \quad (7)$$

L'angle γ en la segona situació vindrà donat per la diferència entre l'angle que existeix entre la línia entre eixos i la horitzontal de la primera (δ_1) i la segona situació (δ_2).

$$\delta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{453 - 375}{1465 \cdot 2}\right) = 1,5249^\circ$$

$$\delta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{(453 - 375) \cdot 0,8}{1465,62 \cdot 2}\right) = 1,2198^\circ \quad (8)$$

$$\gamma_{max} = |\Delta\delta| = 0,3051$$

Aquest es un valor que el seu efecte dependrà de les toleràncies del connector utilitzat.

Finalment una variació en l'angle β podria venir donada per la diferència de desgast entre els neumàtics de la part esquerra i dreta del vehicle. Aquesta situació de diferència d'alçades a cada costat, no és desitjada per al correcte funcionament del vehicle ja que indueix inestabilitat durant el seu funcionament. També cal tenir en compte que en un correcte funcionament del vehicle no hi ha cap causa que pugui provocar aquest tipus de desgast en els neumàtics. Tot i així el connector haurà de tenir una certa elasticitat que permeti una tolerància assequible en el moment de la instal·lació del sistema de connexió.

3.4 Connexió

Per a conèixer una gran part de les especificacions del sistema caldrà conèixer el tipus de bateria que cal carregar i en conseqüència trobarem quin tipus de connector podem utilitzar.

El vehicle EFG 216 i casi tots el vehicles d'aquest tipus a la venda en el mercat actual, disposen d'un tipus de bateries formades per cel·les de ions de liti. Aquestes bateries presenten grans avantatges respecte a les seves predecessores de plom-àcid. Però tot i que les seves prestacions son millors en la gran majoria de camps, requereixen de un sistema de control per a la carrega eficient d'aquestes bateries. Això implica que el connector apart de disposar de connectors de potència, també haurà de disposar de connectors de control que transmetran informació de l'estat

de càrrega de la bateria, la temperatura...

La bateria del vehicle EFG 216 està regulada per la norma DIN 43531 A. Es tracta d'una bateria de ions de liti de tensió de 48 V i capacitat de 750 Ah. El fabricant de la bateria assegura que amb un dels seus carregadors estacionaris, aquesta bateria pot carregar-se en aproximadament 105 minuts. Aquesta informació ens pot donar una idea de quina es la mida que ha de tenir el connector.

$$I_{con} = \frac{750Ah}{105 \text{ min} \cdot 1 \text{ h} / 60 \text{ min}} = 428,6 \text{ A} \quad (9)$$

El connector haurà de ser capaç de transmetre aquesta intensitat d'alimentació i transmetre els senyals de control.

Stäubli és un fabricant de connectors per tot tipus de aplicacions que ofereix una ampla varietat de solucions. Aquesta empresa permet la personalització dels connectors per a poder adaptar-los a diferents situacions i també s'especialitza en l'adaptació d'aquets connectors per a la automatització de processos. (Stäubli, s.d.)

Utilitzant el seu configurador de connectors en línia, s'ha pogut muntar un connector que s'adapta les especificacions de càrrega de la bateria. Els pins d'alimentació han de poder suportar 428,6 A, ha de disposar pins de senyal i algun sistema que ajuda a la alineació entre les parts mascle i femella del connector. Per a complir-ho s'ha escollit aquesta solució representada en el CAD del qual podem veure la vista isomètrica, les part que hi podem veure son, d'esquerra a dreta:

- Dos pins de potència de 245 A i superfície 70 mm² amb les seves cobertes de plàstic per a protecció, que permeten una corrent d'alimentació de 490 A.
- Cinc pins de senyal de 10 A sense coberta que permetran un correcte control del procés de recàrrega de la bateria.
- Una presa a terra amb capacitat de fins a 860 A
- Sistema de guiatge de columnes de punta cònica per assegurar la correcte connexió entre mascle i femella.

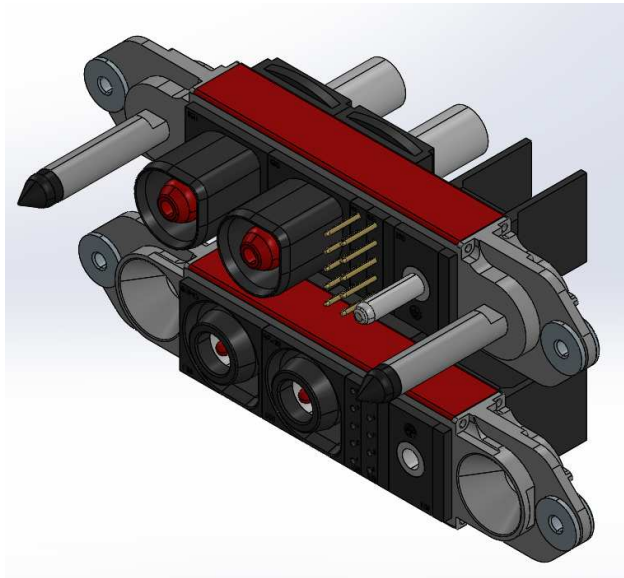


Fig. 17 CAD connector. (Font pròpia)

Tant la part del connector mascle com del femella disposen de dos forats de diàmetre 4,30 mm per a realitzar una unió cargolada de M4 amb la superfície que sigui necessari. El connector té una longitud total de 175 mm i una amplada de 35 mm i segons el fabricant les toleràncies són de 0,1 mm centrades al valor nominal de les cotes.

A més a més el fabricant ofereix per a cada tipus de connexió la força màxima necessària per a poder realitzar-la, d'aquesta manera sumant les forces màximes de cada tipus de connexió de la solució podrem saber quina força hauran de realitzar els actuadors en l'instant que es dugui a terme aquesta acció. En el cas d'aquesta solució, el total són 75 N. Aquesta força de connexió serà una especificació a tenir en compte a l'hora de seleccionar els actuadors i dissenyar el sistema.

En el catàleg del fabricant també s'hi poden trobar les toleràncies a l'hora de realitzar la unió entre el connector mascle i femella. Per a la dimensió en la direcció del moviment de connexió la tolerància és de +1,5 mm, la tolerància en la direcció longitudinal al connector és de $\pm 0,8$ mm i finalment en la direcció transversal és de $\pm 0,9$ mm. Una altra especificació important que podem trobar en el catàleg, és l'angle màxim que pot existir entre les dues parts durant la connexió, que és de 3° en totes les direccions. (Staübli, s.d.)

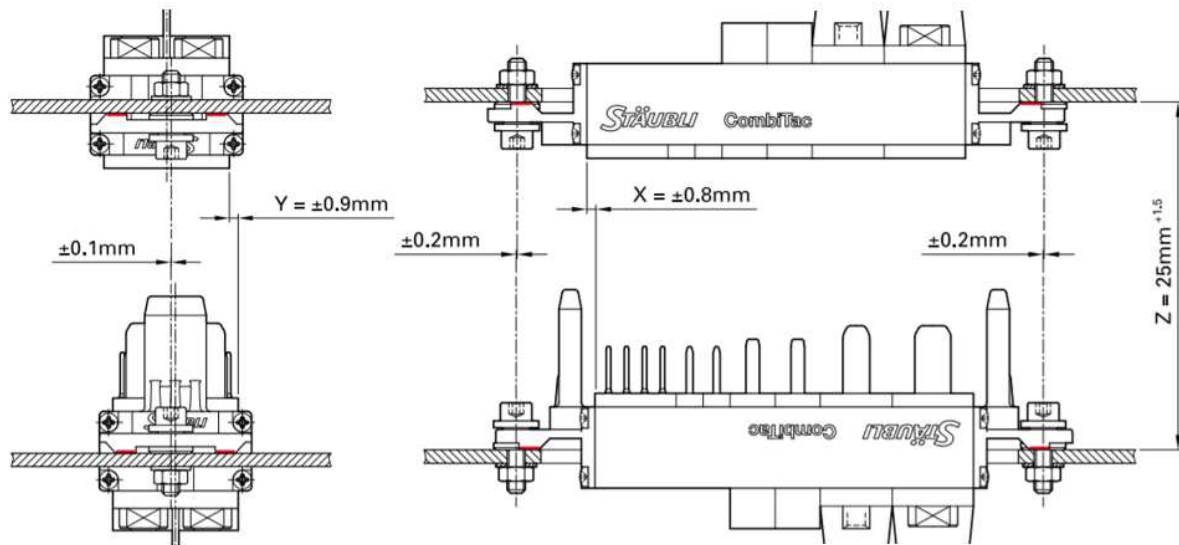


Fig. 18 Toleràncies de descentrament en l'acoblament. (Stäubli, s.d.)

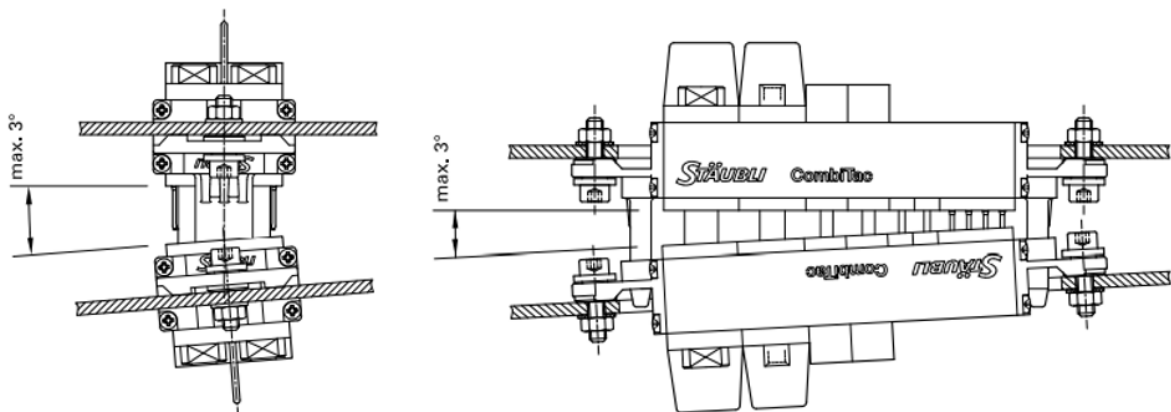


Fig. 19 Toleràncies de desalineament en l'acoblament. (Stäubli, s.d.)

4. Especificacions

En aquest apartat es resumiran en una taula totes les especificacions i consideracions que s'han trobat en el apartats anteriors del document i altres que han vingut definides per la naturalesa del projecte.

Concepte	Requisit/Desig	Descripció
Funció	R	Detectar el vehicle estacionat i preparat per la connexió
	R	Realitzar l'acoblament entre el connector mascle i femella del vehicle estacionat dins la zona acotada per els rangs de x, y, z i α definits a l'apartat "3. Anàlisi del concepte"
	R	Mantenir la connexió amb el sistema durant el procés de càrrega del vehicle.
	R	Desconnectar les dues parts un cop s'hagi completat la càrrega o ho requereixi un operari.
Dimensions	D	Minimitzar l'espai ocupat pel sistema.
	D	Minimitzar el pes.
Moviments	D	La posició de repòs ha de ser llunyana a la zona de connexió per evitar xocs durant l'estacionament.
	D	El temps que el sistema tarda en realitzar la connexió a de ser de l'ordre de pocs segons o menys.
Forces	R	Pes i inèrcies pròpies.
	R	Forces de connexió de 75 N.
	D	Considerar possibles forces degudes a descentraments o desalineaments en la connexió.
Energia	D	Minimitzar el consum energètic del sistema.

Materials	D	Utilització de materials econòmics
Fabricació	R	Utilització de processos que no requereixin utilitatges
	R	Quantitat anual 1
Cost	D	Minimitzar costos de components
Senyals y control	R	Sistema completament autònom
	R	Llaç de control tancat per a correcció d'errors
Manteniment*	R	S'ha de poder desmuntar totalment el sistema
	D	El sistema a de poder acceptar possibles canvis o modificacions a les seves peces
Seguretat*	D	Cobrir aquelles parts que siguin més sensibles del sistema

Taula 3 Especificacions del projecte

*El requisits a complir en els apartats de manteniment y seguretat són poc estrictes per que es tracta d'un prototip. En etapes futures del projecte s'haurien de tenir en compte les especificacions de seguretat i les normatives a complir.

5. Disseny conceptual

En aquest apartat del projecte s'escolliran solucions entre totes les opcions que existeixen en el mercat actual per a automatitzar el procés de connexió per a la recàrrega de bateries del vehicle Jungheinrich EFG 216. Es justificarà l'elecció de les diferents solucions escollides i s'especificarà per que es creu que son les òptimes. Les diferents parts del projecte s'exposaran de manera conceptual i s'entrarà en detall a la part mecànica del sistema.

5.1 Sistema general

El sistema de connexió automàtica haurà de disposar de varies parts que duran a terme les diferents funcions de manera coordinada.

Inicialment l'operari del vehicle haurà d'estacionar-lo a la zona de càrrega. Com interessa que l'operari estacioni dins de l'abast del sistema de connexió, seria important que disposes d'un cert ajut. Per a poder guiar l'operari s'ha arribat a la conclusió que només dos ajuts serien suficients.

El primer dels ajuts que rebrà l'operari està relacionat amb el càlcul de les especificacions dels rangs dels graus de llibertat x i y . Per a calcular el rang d'aquestes dues variables per a cada estacionament, s'ha tingut en compte que la precisió de l'operari era, com a mínim, suficient com per dur a terme la operació bàsica per a la que estan dissenyats aquest vehicles, que és la recollida de palets. Per a concretar més el cas s'han utilitzat unes dimensions de palets normalitzades conegudes com europalets. Per tant un ajut adequat per a l'operari, seria realitzar unes marques en el terra que representin els forats amb les mesures del europalets, de manera que l'operari haurà de fer coincidir la forquilla dins de la marca situada en el terra. Una altre opció viable, tot i que més complicada, seria situar un europalet fixe al terra a la distancia adequada del sistema de connexió, així doncs l'operari només hauria de realitzar la mateixa operació per estacionar a la zona de carrega que per a recollir un europalet.

Considerant les dues possibles solucions, s'ha conclòs que la opció de les marques en el terra es més adequada degut a la simplicitat respecte a la segona presentada. També cal tenir en compte que el sistema aquest ha estat dissenyat per guanyar temps útil per a l'operari i ,tot i que el temps d'estacionament en les dues solucions no difereix, pel que fa respecte al temps de sortida de la zona de càrrega, la opció de les marques al terra té avantatge.

Aquesta solució permetrà al operari disposar de una referència a l'hora de realitzar l'estacionament.

Un altre ajut del qual disposarà l'operari, serà un led, que s'il·luminarà quan el sistema de detecció de posició del vehicle localitzi dins la zona de treball del sistema de connexió automàtica, la part del connector que es troba en el vehicle. D'aquesta manera l'operari quan vegi il·luminar-se el led, sabrà que el vehicle està correctament estacionat.

Aquests dos ajuts dels que disposarà l'operari, facilitaran l'acció d'estacionament i reduiran el temps d'aquesta maniobra.

Com s'ha comentat en apartats anteriors, per a poder realitzar la connexió del vehicle a l'alimentació, la bateria ha d'estar completament desconnectada de la resta de sistemes del vehicle, és a dir que aquests han d'estar completament apagats. Per tant el vehicle haurà de poder informar al sistema de connexió automàtica que està apagat i que el sistema pot realitzar la connexió sense cap tipus de perill. Aquest missatge entre el vehicle i el sistema de connexió es realitzarà a través de un medi que dependrà del sistema de detecció de posició.

Una vegada el sistema sap que el vehicle es troba dins la zona de treball i que està completament aturat, ja es pot dur a terme la connexió al sistema d'alimentació. Per a realitzar aquesta acció, s'haurà de fer servir un sistema mecànic mogut per actuadors que sigui capaç de realitzar els moviments amb precisió suficient. Per a realitzar els moviments correctes, els actuadors estaran controlats per uns *drivers* els quals rebran els senyals de un llaç tancat de control.

Aquest llaç tancat de control disposarà de diferents parts. En primer lloc, els actuadors encarregats de realitzar els moviments, a més a més dels *drivers* encarregats d'alimentar als actuadors. També incorpora el sistema de detecció de posició, que serà l'encarregat de conèixer en tot moment la posició relativa entre la part mascle i la part femella del connector. Finalment el sistema de control, que rebrà el feedback del sistema de detecció de posició i enviarà la informació als *drivers*.

Un cop es realitza la connexió, els actuadors del sistema s'aturen i els connectors queden bloquejats degut a les forces de fricció entre les dues parts, fins que l'operari torna al vehicle i prem el botó de sistema, que realitzarà la desconnexió de ambdues parts i es retirarà a la posició de repòs. Si la càrrega es completa abans que arribi l'operari, el sistema es desconnectarà automàticament, ja que es capaç de conèixer l'estat de la bateria per els pins de senyal que hi ha instal·lats en el connector.

El llaç tancat que requereix aquest sistema de connexió automàtic es complex, i com s'ha comentat en l'apartat de l'abast del projecte, no es mostrarà en detall la part del control del sistema. El que sí que es definirà en detall serà la part mecànica d'aquest.

5.2 Detecció de posició

El mètode escollit per a detectar la posició de la part del connector del vehicle, es l'anàlisi de la imatge. Aquest es un mètode que ha anat guanyant popularitat en els últims anys i cada cop es més utilitzat en la indústria degut a la seva facilitat d'ús.

Més concretament s'ha decidit utilitzar els marcadors ARUCO. Aquest marcadors son semblants als codis QR i es poden enganxar en qualsevol superfície. Aquets marcadors són completament quadrats i mitjançant la distorsió del quadrat, la inclinació i la mida des de el punt de vista de la càmera, son capaços de conèixer amb precisió la posició que existeix entre la càmera i el marcador. La informació que aquest sistema de detecció fa servir són les distàncies relatives entre la càmera i el marcador en els tres eixos. Aquests venen definits pel codi de dins del marcador i l'angle que tenen aquets tres eixos respecte la vista de la càmera.

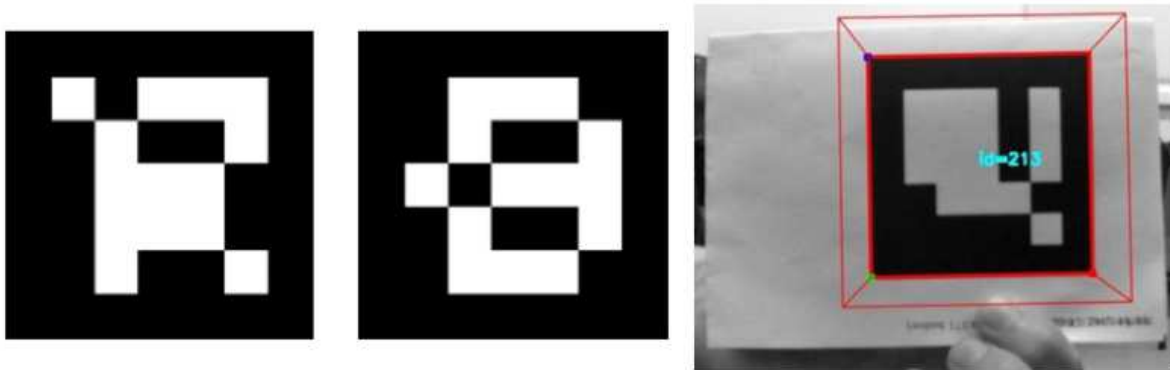


Fig. 20 Aruco markers. (Babinec, Jurisica, Hubinsky, & Duchon, 2014)

Aquest tipus d'anàlisi d'imatge té una precisió que va augmentant quan el marcador es troba més proper a la càmera, per això s'ha arribat a la conclusió que per realitzar una realimentació de la posició relativa precisa, la càmera que estarà captant la imatge del marcador haurà d'estar situada en la part mòbil del sistema que té incorporat el connector. Per tant la càmera, al llarg de l'acció de connexió, s'anirà movent i apropant a la marca ARUCO i en conseqüència cada vegada hi haurà una retroalimentació més precisa.

A l'estudi "Visual localization of Mobile robot using artificial Markers" s'ha pogut provar que a distàncies curtes de menys de 10 cm i amb càmeres HDR de al voltant de 0,5 Mpx de resolució, l'error comés per aquest sistema esta per sota 0,5 mil·límetres en termes de distància i per sota de 0,5° pel que refereix als angles. Aquests valors compleixen les toleràncies desitjades. (Babinec, Jurisica, Hubinsky, & Duchon, 2014)

5.3 Sistema mecànic coordenades x i y

Degut a les especificacions que es tenen en el projecte, el sistema mecànic ha de poder fer front a quatre graus de llibertat amb els rangs requerits. Existeix una gran diferència entre les especificacions que requereixen cadascuna d'aquestes variables. Les variables x i y tenen un rang definit per un espai de treball en dues dimensions que son de mida semblant. Per altre banda existeix el grau de llibertat α , que és l'angle relatiu entre la superfície de referència i la superfície del connector del vehicle, i el rang d'aquesta variable es poc més gran de 10° . Finalment està el grau de llibertat z que ve donat per el desgast de les rodes, tenint així un rang menor que les altres dimensions, a més del fet que la variació d'aquesta coordenada es mínima entre dos estacionaments contigus.

Es per això que s'ha considerat la opció de dissenyar subsistemes (x/y, α , z) diferents per aquests 3 grups de variables, de manera que aquets tres sistemes estiguin sobreposats i cadascun pugui complir les seves especificacions.

El subsistema mecànic a càrrec de cobrir les variables x / y, ha de poder adaptar-se a complir els rangs d'aquestes variables, ha de ser un sistema que requereixi poc manteniment, el més simple possible, per abaratir costos i s'ha de poder instal·lar en una superfície vertical com per exemple una paret. El fet que aquest sistema requereixi poc manteniment en un entorn industrial descarta per complet la utilització de guies, ja que les articulacions son més fàcils de protegir i mes simples de muntar. Per tant s'ha decidit dissenyar un sistema de dues variables que utilitzi articulacions.

Un altre punt a tenir en compte és la posició dels actuadors, si es sobreposen els dos actuadors en un únic braç, s'obtindria un sistema el més senzill possible amb dues articulacions. De manera que el sistema seria: un actuadors fix al terra, que controla la orientació del braç proximal i un actuador al final del braç proximal que controla la orientació del braç distal. Inclús es podria pensar en afegir un actuador a la part final que controlaria la orientació del connector i en conseqüència α .

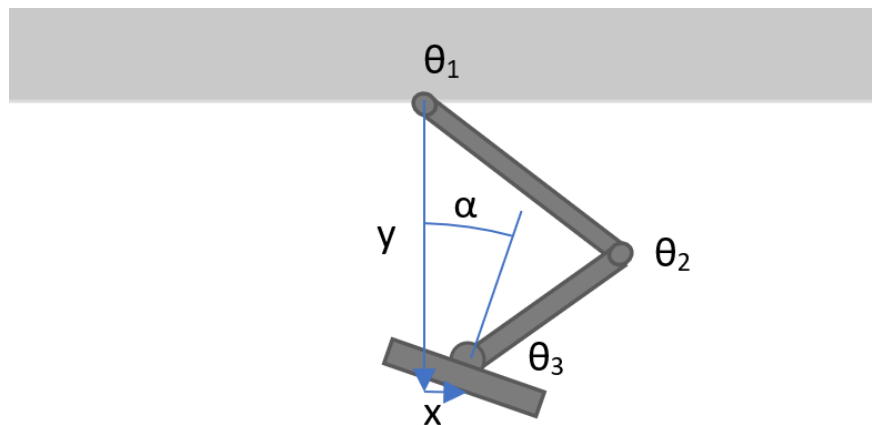


Fig. 21 Proposta de solució 1 . (Font pròpia)

El problema d'aquest sistema mecànic és que qualsevol força aplicada en el connector, com per exemple la força de 82 N de connexió, ha de ser suportada per un únic braç. El braç proximal i l'actuador fixe a la paret han de poder suportar totes les forces que rebí el sistema. A més l'actuador fixe a la paret ha de poder moure amb precisió la resta del sistema, que implica els dos braços, els actuadors (θ_2 i θ_3), les articulacions i el connector, de manera que hauria de ser capaç de crear un parell molt gran, tant en estàtic per a realitzar la connexió, com en moviment per accelerar totes les masses que estan per sota seu.

Per aquest motiu s'ha cregut que la millor opció seria situar els actuadors fixes a la paret i transmetre el moviment al capçal a partir d'enllaços que permetin situar el connector en la posició adequada.

En el món de la indústria existeix un sistema mecànic que s'ha comentat anteriorment en aquest document i que es molt utilitzat en aplicacions de 'pick and place'. Aquest sistema és el robot delta, que existeix en dues versions, la 3D i la 2D.

La versió 3D d'aquest robot, com s'ha explicat anteriorment, es capaç de canviar la posició del capçal en els eixos x , y i z sense canviar la seva orientació utilitzant tres actuadors angulars. El robot 2D es comporta de la mateixa manera però només es capaç de moure's en el pla x - y de manera que només es compona de 2 actuadors. Degut a que en el nostre cas, les especificacions del grau de llibertat z son molt diferents a les que s'exigeixen a x / y , s'ha decidit utilitzar la versió de 2 dimensions i realitzar el moviment en z amb una altre sistema.

El sistema delta 2D disposa de 2 actuadors fixes a la referència, que mouen dos braços proximals respectivament. Aquests braços proximals estan connectats amb articulacions de dues dimensions als braços distals, que es connecten al capçal. Per a mantenir l'orientació del capçal, en un dels dos braços articulats es creen dos mecanismes de paral·lelograms articulats, un en

el braç proximal i l'altre en el braç distal. D'aquesta manera amb la utilització de dos actuadors i articulacions es poden obtenir dos graus de llibertat controlats, mantenint la orientació del capçal respecte al terra. En la següent figura, es pot apreciar la geometria d'un robot 2 delta que ofereix el fabricant Schneider Electric. (Schneider Electric, s.d.)



Fig. 22 Lexium T Robot. (Schneider Electric, s.d.)

El robot 2 delta també es coneix en alguns camps com a robot diamant (Huang, Mei, Li, & Zhao, 2005). En alguns casos, degut a la funció que ha de realitzar el robot, el sistema no requereix el paral·lelogram en els seus braços és la versió simplificada (Arduino, 2018).

Aquest robot diamant simplificat, també disposaria de dos actuadors fixes a la referència i els quatre braços, dos proximals connectats als actuadors i dos distals connectats al capçal, però els paral·lelograms articulats ja no formarien part del sistema.

Finalment s'ha decidit utilitzar el robot diamant sense necessitat dels paral·lelograms en els seus braços, degut a la seva simplicitat de estructura i muntatge respecte a les altres versions. Com s'explicarà en el pròxim apartat, s'ha descobert un sistema de control de l'angle α del connector, que no requereix que el capçal tingui una orientació fixe per a tenir-lo com a referència respecte a la que girar.

Per tant, el sistema escollit per controlar els graus de llibertat x / y ha estat el robot diamant, per la seva simplicitat en el muntatge i en el manteniment. Al mateix temps perquè és un sistema capaç de abastar els rangs de les coordenades x / y , i degut a la seva geometria accepta la fàcil superposició de altres sistemes mecànics, que permeten el control de les altres variables que faltaran per actuar.

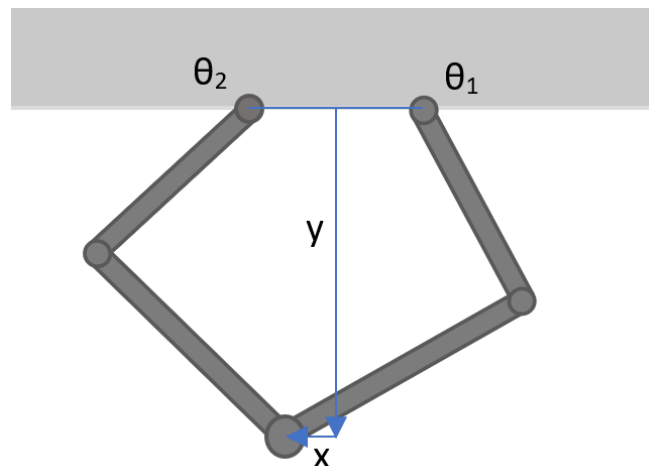


Fig. 23 Robot Diamant. (Font pròpia)

Aquest sistema mecànic descrit, té paràmetres que caldrà definir per que pugui complir tots els requisits que es necessiten en aquest projecte, però aquesta part es durà terme en l'apartat de disseny de materialització.

5.4 Sistema mecànic angle alfa

Tal com s'ha esmentat anteriorment, una de les solucions seria situar un actuador en el capçal del sistema diamant. Aquest actuador α controlaria la orientació del capçal respecte a un dels braços distals. Però això implicaria que els actuadors del sistema diamant haurien de desplaçar la massa addicional del actuador α i això podria afectar la seva precisió.

Per tant, s'han buscat solucions que permetin situar l'actuador que controla l'angle alfa fixe a la referència. Hi ha diferents solucions possibles, però la que més s'ajusta a la complexitat i les característiques del nostre projecte és la utilització d'un sistema de politges que permetin la transferència de la rotació des de la referència fins al capçal.

Un dels problemes a solucionar en la utilització del sistema de politges, és que la corretja mantingui la tensió per a qualsevol posició del sistema de diamant, ja que s'ha de poder variar la orientació de α per a qualsevol posició en el pla x/y . La solució conceptual per aquest problema és situar dos jocs de politges i corretges que estan connectades entre elles.

La primera politja (P1) serà moguda per l'actuador i haurà de girar al voltant del mateix eix que l'articulació fixe del sistema de diamant. La segona politja (P2), que rep el parell de l'actuador a través de la transmissió de corretja, i gira respecte l'eix de l'articulació que hi ha entre el braç proximal i el braç distal (colze). La tercera politja (P3) que es troba en el mateix eix que la segona

i rep el parell d'aquesta mitjançant una unió mecànica que s'haurà d'estudiar. I finalment, la quarta (P4) politja que rep el parell de la tercera a través d'una transmissió per corretges i està situada en l'eix del capçal, d'aquesta manera pot orientar el connector satisfent les necessitats de α .

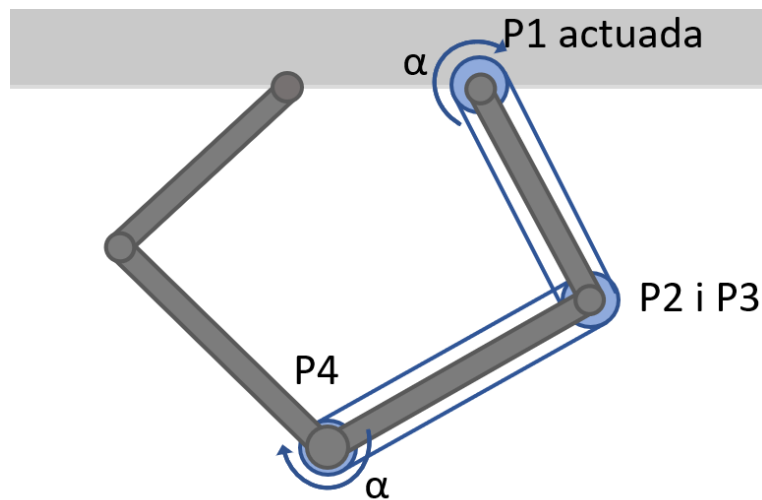


Fig. 24 Sistema de politges proposat. (Font Pròpia)

En aquest sistema de transmissió es busca que existeixi una coordinació precisa entre la politja 1 que es la actuada i la politja 4 que controlarà l'orientació del capçal. Per a poder complir amb aquesta coordinació, caldrà fer servir corretges síncrones dentades, que permeten una transmissió de parell amb lliscaments mínims en els sistemes en que es requereix precisió, com en el cas del projecte.

Una altre consideració en el sistema de politges i corretges, és que caldrà utilitzar un sistema reductor en l'actuador, ja que com s'ha comentat a l'apartat d'especificacions, α té un rang d'aproximadament 10° . Per fer això es reduiran les voltes del actuador abans d'activar P1, ja que en aquest sistema seria interessant utilitzar politges amb ratis de transmissió igual a 1 per evitar desequilibris que indueixin forces en el sistema de diamant.

5.5 Sistema mecànic en z

Com s'ha comentat en les especificacions, aquesta coordenada té un rang de 45,3 mm i no variarà en tots el estacionaments, de manera que l'actuador de z només s'accionarà quan el desgast de les rodes que varia l'alçada de la part del connector del vehicle excedeixi un límit, i el sistema consideri que es necessari disminuir l'alçada del sistema de connexió.

Degut a la poca utilització d'aquest actuador, s'ha cregut que una opció viable seria situar una actuador lineal, que mitjançant unes guies, sigui capaç de moure tot el sistema de connexió en

direcció vertical, adaptant-lo a la nova alçada del connector del vehicle.

L'actuador a càrrec d'aquest moviment caldria que disposés de un reductor amb un rati de reducció elevat, ja que es busca un velocitat disminuïda, però un parell que sigui capaç de moure el pes de tot el sistema en la direcció vertical.

Aquest eix haurà de disposar de una vara amb rosca trapezoidal que permetrà que el sistema no cedeixi verticalment degut a l'acció de la gravetat, gracies a la capacitat d'autobloqueig d'aquest tipus de rosca.

6. Síntesi del mecanisme

En aquest apartat del document s'analitza el tipus de mecanisme escollit a l'apartat anterior per a obtenir les equacions que el governen. Totes les expressions esmentades en aquest apartat s'utilitzaran en apartats posteriors per a realitzar càlculs sobre el disseny final i son útils per a fer el disseny del sistema de control.

6.1 Anàlisi geomètric

Per a poder dimensionar el sistema de diamant complint els requeriment de les coordenades x/y , cal realitzar una anàlisi d'aquest sistema per a conèixer quin impacte tenen els diferents paràmetres en el compliment de les especificacions. Per començar es busca la relació que existeix entre els angles actuats dels braços proximals i la posició x / y del capçal.

Per a realitzar els càlculs s'utilitzen els següents paràmetres, variables i sistemes de coordenades.

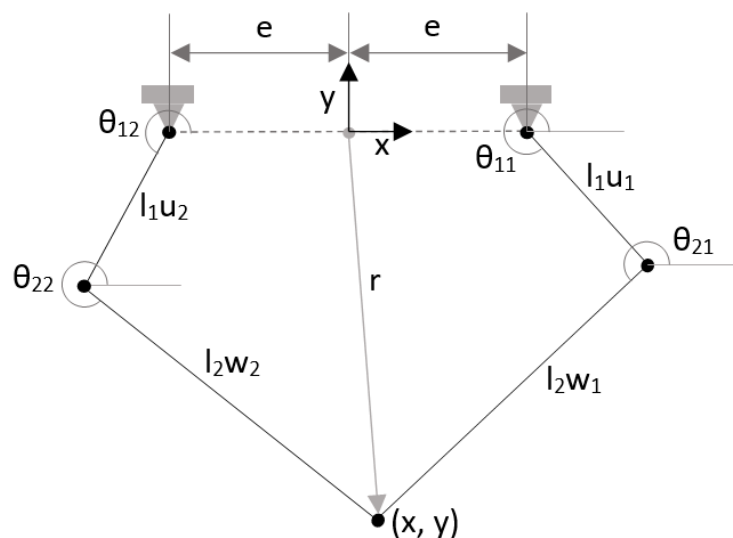


Fig. 25 Eixos de referència i variables del robot diamant. (Font pròpia)

Com es pot veure el sistema conta amb tres paràmetres e , l_1 i l_2 , i s'han definit sis variables de les quals únicament dues d'elles son independents, degut a que els actuadors estaran situats a la superfície de referència. Seria interessant conèixer la relació que existeix entre les variables θ_{21} i θ_{22} que seran les actuades i les variables x / y que seran les de la posició del capçal del sistema diamant (Huang, Li, Li, Chetwynd, & Gosselin, 2004)

Inicialment es pot definir el vector r en funció dels paràmetres i els versors del sistema.

$$\begin{aligned}\bar{r} &= e + l_1 \cdot \hat{u}_1 + l_2 \cdot \hat{w}_1, & \hat{u}_1 &= (\cos\theta_{11}, \sin\theta_{11})^T, & \hat{w}_1 &= (\cos\theta_{21}, \sin\theta_{21})^T \\ \bar{r} &= -e + l_1 \cdot \hat{u}_2 + l_2 \cdot \hat{w}_2, & \hat{u}_2 &= (\cos\theta_{12}, \sin\theta_{12})^T, \\ & & \hat{w}_2 &= (\cos\theta_{22}, \sin\theta_{22})^T\end{aligned}\quad (10)$$

Per el cas del braç de la dreta $i=1$ tenim:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_1 \cos\theta_{11} \\ l_1 \sin\theta_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 \cos\theta_{21} \\ l_2 \sin\theta_{21} \end{bmatrix}\quad (11)$$

Aplicant els mòduls a banda i banda de (10):

$$\sqrt{(x - e - l_1 \cos\theta_{11})^2 + (y - l_1 \sin\theta_{11})^2} = \sqrt{(l_2 \cos\theta_{21})^2 + (l_2 \sin\theta_{21})^2}\quad (12)$$

$$l_1^2 + l_1 \cos\theta_{11} \cdot (2e - 2x) + l_1 \sin\theta_{11} \cdot (-2y) + x^2 + e^2 - 2ex + y^2 - l_2^2 = 0$$

D'aquesta manera obtenim una equació trigonomètrica per el braç dret $i=1$ i per el braç esquerra $i=2$ de forma i coeficients:

$$A_i \cdot \sin \theta_{1i} + B_i \cdot \cos \theta_{1i} + C_i = 0, \quad i = 1,2$$

$$A_1 = -2l_1 y \quad , \quad A_2 = -2l_1 y\quad (13)$$

$$B_1 = 2l_1(e - x) \quad , \quad B_2 = -2l_1(e + x)$$

$$\begin{aligned}C_1 &= x^2 + y^2 + e^2 - 2ex + l_1^2 - l_2^2 \quad , C_2 \\ &= x^2 + y^2 + e^2 + 2ex + l_1^2 - l_2^2\end{aligned}$$

Aïllant θ_{21} i θ_{22} de les equacions es podrà conèixer quins valors hauran de tenir aquests angles per aconseguir una posició (x, y) . Aplicant el següent canvi de variable per resoldre la equació:

$$\tan \frac{\theta_{1i}}{2} = t$$

$$\sin \theta_{1i} = \frac{2t}{1 + t^2}\quad (14)$$

$$\cos \theta_{1i} = \frac{1 - t^2}{1 + t^2}$$

S'obté:

$$A_i \cdot \frac{2t}{1+t^2} + B_i \cdot \frac{1-t^2}{1+t^2} + C_i = 0, \quad i = 1,2 \quad (15)$$

Finalment resolent l'equació de segon grau i considerant únicament les solucions que s'adapten al sistema representat anteriorment:

$$\theta_{11} = 2 \arctan \frac{-A_1 + \sqrt{A_1^2 - C_1^2 + B_1^2}}{C_1 - B_1} \quad (16)$$

$$\theta_{12} = 2 \arctan \frac{-A_2 - \sqrt{A_2^2 - C_2^2 + B_2^2}}{C_2 - B_2}$$

Per tant utilitzant aquestes equacions i havent definit prèviament els paràmetres (e , l_1 , l_2) es pot obtenir els valors de θ_{11} i θ_{12} que s'han de forçar en els actuadors per a obtenir la posició de sortida (x , y).

6.2 Anàlisi cinemàtic

En aquest apartat es vol obtenir la relació que existeix entre les velocitats de rotació del actuadors i la velocitat que es pot transmetre al capçal en una determinada posició del sistema (Huang, Li, Li, Chetwynd, & Gosselin, 2004). Derivant les equacions (10) per a cada braç del sistema s'obté:

$$\bar{v} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = l_1 \cdot \dot{\theta}_{1i} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \theta_{1i} \\ \cos \theta_{1i} \end{bmatrix} + l_2 \cdot \dot{\theta}_{2i} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \theta_{2i} \\ \cos \theta_{2i} \end{bmatrix}, \quad i = 1,2 \quad (17)$$

Aïllant w_i de la equació (10) del braç 1

$$\hat{w}_1 = \frac{\bar{r} - e \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} - l_1 \cdot \hat{u}_1}{l_2} \quad (18)$$

Substituint, per més claredat, $\dot{\theta}_{1i}$ per \dot{q}_i i reescrivint l'equació (17)

$$\bar{v} = l_1 \cdot \dot{q}_1 \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{u}_1 + l_2 \cdot \dot{\theta}_{2i} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{w}_1, \quad i = 1,2 \quad (19)$$

Multiplicant a banda i banda de la equació (19) per el vector \hat{w}_1^T .

$$\begin{aligned} \hat{w}_1^T \cdot \bar{v} &= \hat{w}_1^T \cdot l_1 \cdot \dot{q}_1 \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{u}_1 + \hat{w}_1^T \cdot l_2 \cdot \dot{\theta}_{2i} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{w}_1, \quad i \\ &= 1,2 \end{aligned} \quad (20)$$

Operant l'últim terme de l'equació (20) es pot veure que el valor d'aquest es 0 y per tant, aïllant la coordenada actuada \dot{q}_1 per a trobar el Jacobià del sistema obtenim:

$$\dot{q}_1 = \frac{1}{l_1} \cdot (\hat{w}_1^T \cdot [Q] \cdot \hat{u}_1)^{-1} \cdot \hat{w}_1^T \cdot \bar{v}, \quad [Q] = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Anàlogament es segueix el mateix procediment per el braç 2.

$$\dot{q}_2 = \frac{1}{l_1} \cdot (\hat{w}_2^T \cdot [Q] \cdot \hat{u}_2)^{-1} \cdot \hat{w}_2^T \cdot \bar{v}, \quad [Q] = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Finalment, combinant les equacions (21) i (22) s'obté la matriu Jacobiana que permetrà, donada una configuració del sistema, obtenir les velocitats que s'ha de forçar als actuadors q_1 i q_2 per a que el capçal es mogui amb les velocitats v_x i v_y .

$$\dot{\bar{q}} = [J] \cdot \bar{v}, \quad [J] = \frac{1}{l_1} \cdot \begin{bmatrix} \hat{w}_1^T \cdot [Q] \cdot \hat{u}_1 & 0 \\ 0 & \hat{w}_2^T \cdot [Q] \cdot \hat{u}_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \hat{w}_1^T \\ \hat{w}_2^T \end{bmatrix} \quad (23)$$

Per a especificar els casos dels moviments en x / y, i comprovar la validesa del càlculs realitzats per a trobar la matriu jacobiana, es realitzaran dos estudis concrets de les velocitats del capçal en la direcció y i en la direcció x.

En la direcció y tenim la configuració:

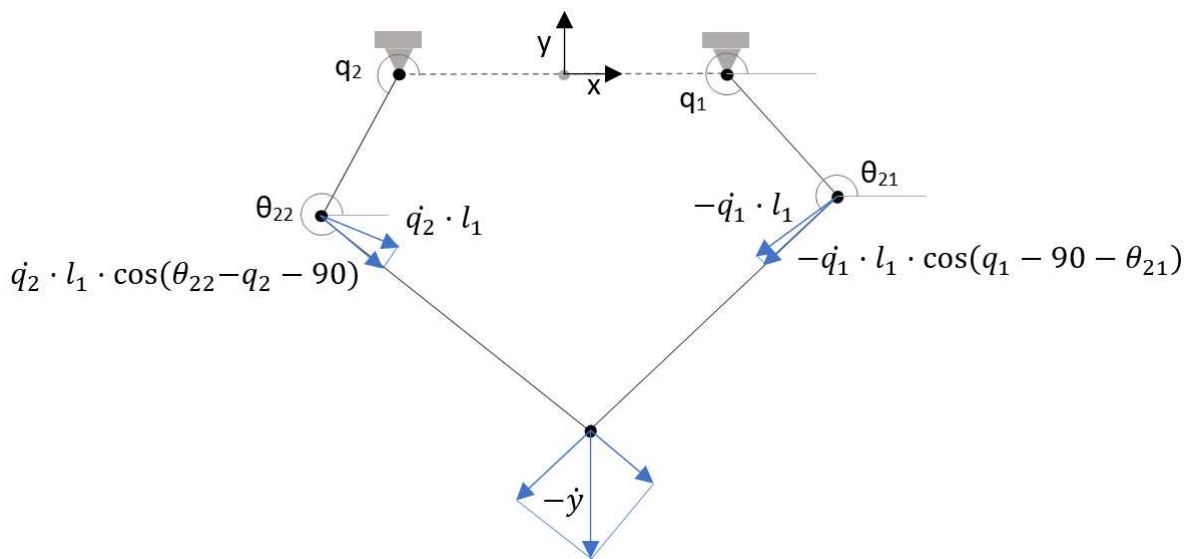


Fig. 26 Velocitats del sistema de diamant (Font pròpia)

Les velocitats trobades en els colzes del sistema han de traduir-se en una velocitat vertical en el capçal, això implica que per els dos braços s'obté:

$$\dot{y} = \frac{\dot{q}_1 \cdot l_1 \cdot \cos(q_1 - 90 - \theta_{21})}{\cos(270 - \theta_{21})}, \quad \dot{y} = \frac{-\dot{q}_2 \cdot l_1 \cdot \cos(\theta_{22} - q_2 - 90)}{\cos(\theta_{22} - 270)} \quad (24)$$

Aïllant les coordenades actuades.

$$\dot{q}_1 = \dot{y} \cdot \frac{\cos(270 - \theta_{21})}{l_1 \cdot \cos(q_1 - 90 - \theta_{21})}, \quad \dot{q}_2 = \dot{y} \cdot \frac{-\cos(\theta_{22} - 270)}{l_1 \cdot \cos(\theta_{22} - q_2 - 90)} \quad (25)$$

Paral·lelament es poden realitzar els mateixos càlculs per a al coordenada x, obtenint les següents expressions.

$$\dot{q}_1 = \dot{x} \cdot \frac{\cos(\theta_{21} - 180)}{l_1 \cdot \cos(q_1 - 90 - \theta_{21})}, \quad \dot{q}_2 = \dot{x} \cdot \frac{\cos(\theta_{22})}{l_1 \cdot \cos(\theta_{22} - q_2 - 90)} \quad (26)$$

Operant les equacions (22), (23) i (20) es fàcil veure que les expressions trigonomètriques son equivalents, per tant ja es te confirmació de la validesa d'aquestes.

6.3 Anàlisi de forces estàtiques

Tal com s'ha comentat en l'apartat d'especificacions, el fabricant Stäubli proporciona els valors de la força màxima necessària per a realitzar la connexió de cada un dels seus connectors, per tal de poder realitzar els càlculs pertinents per automatitzar el procés.

La xifra en Newtons que s'ha obtingut per el connector escollit ha sigut de 75 N. Per a realitzar la connexió els actuadors han de moure el capçal del sistema lentament per a tenir precisió i hauran de poder exercir els 75 N en el capçal. Es per això que en el moment de la connexió s'ha considerat que el anàlisi més adequat es l'estàtic.

No només cal tenir en compte la magnitud d'aquesta força, sinó també la direcció que pren, que segons el fabricant serà en la direcció del moviment de la connexió. Això implica que aquesta força prendrà la orientació de l'angle α entre la perpendicular de la superfície de referència i la perpendicular al connector del vehicle, y per tant la direcció estarà acotada al mateix rang que l'angle α .

Per a realitzar aquest estudi es suposa que la força de connexió esta centrada en l'articulació del capçal i que els braços no transmeten forces perpendiculars ni parells deguts a la fricció.

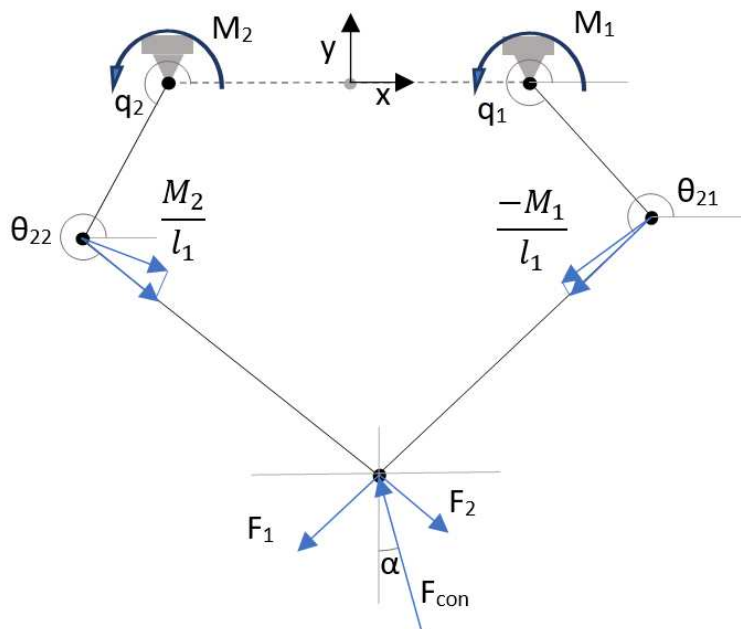


Fig. 27 Forces estàtiques sobre el sistema diamant

Les forces F_1 i F_2 tenen les expressions:

$$F_1 = \frac{-M_1}{l_1 \cdot \cos(q_1 - 90 - \theta_{21})}, F_2 = \frac{M_2}{l_1 \cdot \cos(\theta_{22} - q_2 - 90)} \quad (27)$$

I per tant, es pot obtenir un sistema de dues equacions per a les coordenades x i y.

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{con} \cdot \cos \alpha = \frac{-M_1}{l_1 \cdot \cos(q_1 - 90 - \theta_{21})} \cdot \sin \theta_{21} - \frac{M_2}{l_1 \cdot \cos(\theta_{22} - q_2 - 90)} \cdot \sin \theta_{22} \\ F_{con} \cdot \sin \alpha - \frac{M_1}{l_1 \cdot \cos(q_1 - 90 - \theta_{21})} \cdot \cos \theta_{21} = \frac{M_2}{l_1 \cdot \cos(\theta_{22} - q_2 - 90)} \cdot \cos \theta_{22} \end{array} \right\} \quad (28)$$

Aquest sistema d'equacions permet conèixer els parells M_1 i M_2 que han de executar els actuadors per a realitzar la connexió en una posició (x, y) i orientació (α) determinades.

6.4 Anàlisi de forces dinàmiques

En aquest apartat es realitzen una anàlisi orientatiu dels parells que han de generar els actuadors del sistema diamant per produir una acceleració en el capçal.

El sistema d'anàlisi és una simplificació del sistema real, ja que no es considera cap tipus de inèrcia i només es té en compte una única massa, que és la massa del capçal. Per això el resultat d'aquest anàlisi són únicament orientatius.

Per escollir la massa m del capçal, s'ha de conèixer la massa del connector i considerar unes masses addicionals, que representarien la articulació i totes les altres peces del capçal. A més de altres parts del sistema, que per simplificar l'anàlisi no hem considerat.

Per a realitzar els càlculs, s'ha dut a terme el mètode de les potències virtuals en les direccions x / y. Així es crea un sistema d'equacions que permet trobar els parells dels actuadors per una acceleració en qualsevol direcció.

En el sistema estudiat, les úniques forces que generen potència per moviments del capçal en la direcció x / y son el parells M_1 i M_2 dels actuadors i les forces d'inèrcia inherents a aquests dos moviments.

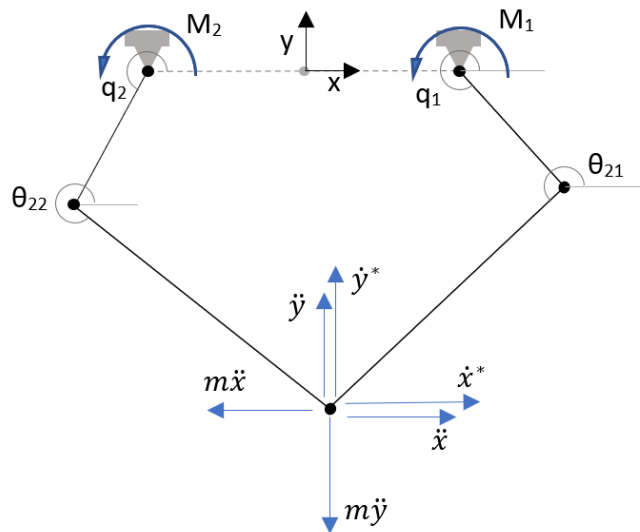


Fig. 28 Forces dinàmiques sobre el sistema diamant

Per al moviment virtual \dot{y}^* s'obté l'expressió:

$$M_1 \cdot \dot{q}_1^* + M_2 \cdot \dot{q}_2^* - m\dot{y} \cdot \dot{y}^* = 0 \quad (29)$$

De les expressions (22) obtenim la relació existent entre \dot{q}_1^* , \dot{q}_2^* i \dot{y}^* i aïllem \dot{y} .

$$M_1 \cdot \dot{y}^* \cdot \frac{\cos(270 - \theta_{21})}{l_1 \cdot \cos(q_1 - 90 - \theta_{21})} + M_2 \cdot \dot{y}^* \cdot \frac{-\cos(\theta_{22} - 270)}{l_1 \cdot \cos(\theta_{22} - q_2 - 90)} - m\dot{y} \cdot \dot{y}^* = 0 \quad (30)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{m \cdot l_1} \cdot \left(M_1 \cdot \frac{\cos(270 - \theta_{21})}{\cos(q_1 - 90 - \theta_{21})} - M_2 \cdot \frac{\cos(\theta_{22} - 270)}{\cos(\theta_{22} - q_2 - 90)} \right)$$

Paral·lelament del moviment virtual \dot{x}^* s'obté:

$$M_1 \cdot \dot{q}_1^* + M_2 \cdot \dot{q}_2^* - m\dot{x} \cdot \dot{x}^* = 0 \quad (31)$$

I substituint les expressions (23)

$$\dot{x} = \frac{1}{m \cdot l_1} \cdot \left(M_1 \cdot \frac{\cos(\theta_{21} - 180)}{\cos(q_1 - 90 - \theta_{21})} + M_2 \cdot \frac{\cos(\theta_{22})}{\cos(\theta_{22} - q_2 - 90)} \right) \quad (32)$$

Les expressions (27) i (29) combinades formen un sistema d'equacions que permet calcular els parells dels actuadors necessaris per a crear una acceleració determinada en una certa direcció, amb el sistema ben definit tant en massa com en dimensions.

6.5 Espai de treball

L'espai de treball d'aquest sistema quedarà definit per el rang de les coordenades x / y i α trobats a l'apartat "3.2 Rang dels graus de llibertat" i també per les dimensions del connector que han sigut facilitades pel fabricant.

Representant el rang d'aquestes coordenades respecte la s'obté la següent zona de treball.

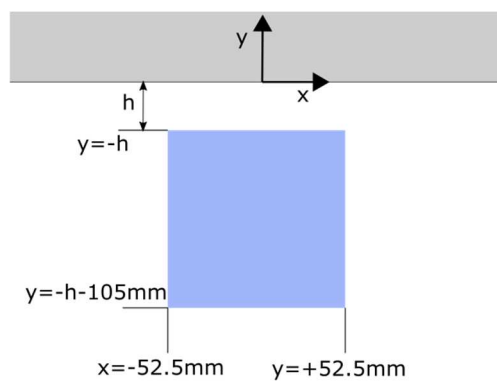


Fig. 29 Rang de les coordenades (Font pròpia)

On la cota h depèn de les dimensions del sistema connexió. L'espai de treball que s'ha representat, únicament té en compte el rang de les coordenades, però realment també caldrà tenir en compte les dimensions del connector.

La vista en planta del connector mascle es la següent (cotes indicades en mm).

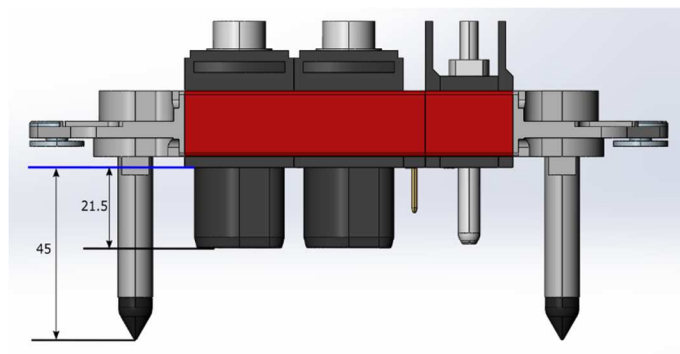


Fig. 30 planta connector mascle (Font pròpia)

La línia blava de la imatge indica la superfície del punt final de la connexió.

Segons el fabricant de connectors, les columnes de guiat no afegixen cap tipus de resistència a la connexió dels components mascle i femella, per tant, les forces de connexió apareixeran quan el primer dels pins, el de potència, comenci la seva connexió (Staübli, s.d.).

Tenint en compte les dimensions de les columnes de guiatge i les dimensions dels connectors, s'ha de modificar l'espai de treball de la següent manera.

Per la part superior de la zona de treball (la més propera a la paret), caldrà ampliar el rang de y ja que el sistema requerirà un d'espai addicional per a poder encarar i alinear els dos connectors. Aquest espai addicional queda definit per la longitud de les columnes de guiatge. Cal tenir en compte que en les forces de connexió no apareixeran fins que el primer dels pins no entri en contacte, i aquest pin es troba a 21.5 mm de la superfície final de connexió.

Degut a que l'orientació del connector femella dins la zona de x/y pot variar el seu angle α de -5.14° a 5.14° . Cap la possibilitat de que es trobi en un dels extrems, dret o esquerra de la zona representada anteriorment, amb un angle orientat cap a l'exterior de la zona de 5.14° . Això fa que la zona de treball hagi de créixer en la coordenada x per a poder contemplar aquets casos. Si es vol que les columnes de guiatge puguin entrar dins els forats del connector femella, el rang en x es veurà modificat per la següent expressió, considerant 5 mm de marge:

$$R_x = 105 + 50 \cdot 2 \cdot \sin(5.14^\circ) \approx 115 \text{ mm} \quad (33)$$

S'ha arrodonit el valor a la alça per a simplificar els resultats.

Una altre vegada cal tenir en compte que les forces de connexió no apareixeran fins que no hi hagi contacte amb el primer pin. Per tant el rang de x per a la zona de forces de connexió serà:

$$R_x = 105 + 21.5 \cdot 2 \cdot \sin(5.14^\circ) \approx 110 \text{ mm} \quad (34)$$

Presentades aquestes modificacions es pot veure que depenent de quin concepte es faci referència, les zones de treball son diferents, és per això que finalment s'han definit 3 zones de treball:

- Zona de connexió: Es el conjunt de punts en el pla x/y on el sistema serà capaç de realitzar la connexió. Aquesta zona ha estat definida únicament per l'apartat "3.3 Rang de coordenades".

$$x \in [-52.5 ; 52.5] \quad , \quad y \in [-h' - 50 - 105 ; -h' - 50] \quad (35)$$

- Zona de moviment: es la zona en el pla x/y en la qual es requereix que el connector mascle es pugui moure amb llibertat per a poder realitzar la connexió. Aquesta zona està definida per la zona de connexió i la longitud de les columnes de guiat.

$$x \in [-57.5 ; 57.5] \quad , \quad y \in [-h' - 50 - 105 ; -h'] \quad (36)$$

- Zona de forces de connexió: es l'espai en el pla x/y en el que cal considerar l'aplicació de les forces de connexió sobre el connector mascle i per tant sobre el sistema.

$$x \in [-55 ; 55] \quad , \quad y \in [-h' - 50 - 105 ; -h' - (50 + 21.5)] \quad (37)$$

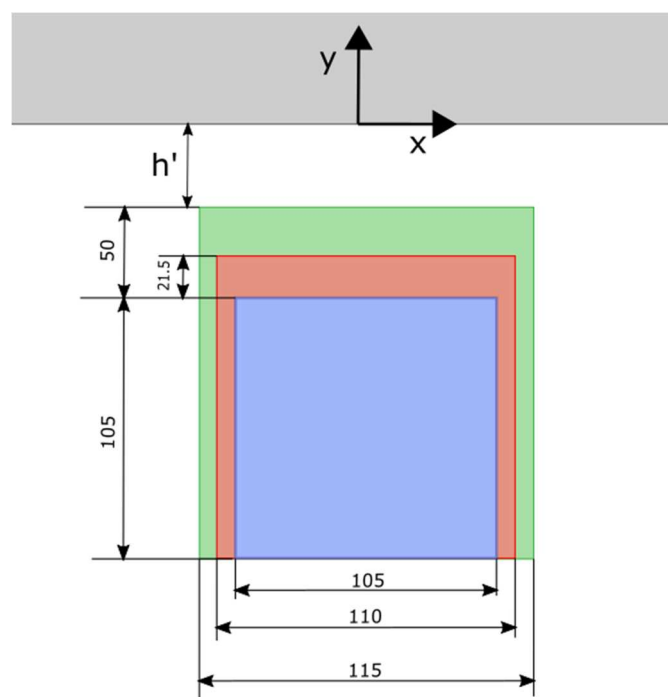


Fig. 31 Zones de treball del sistema, cotes en mm. (Font pòpia)

En la imatge es poden veure representades les diferents zones de treball. La cota h' que ve definida tant per les dimensions del disseny, com per les longituds dels braços, com per la distància entre les articulacions fixes a la superfície de referència, també per la distància existent entre la cara del punt final de connexió del connector i l'articulació final del sistema.

7. Disseny de materialització

En aquest apartat es mostra, el disseny que s'ha realitzat, de manera justificada amb la intenció de donar una visió general de les formes i funcionament del sistema. També els conceptes constructius i de muntatge que es consideren especialment rellevants. Per a fer-ho de manera ordenada, es desglossa el sistema en diferents subgrups, articulacions o parts indicant les relacions entre elles.

Per a millor comprensió d'aquest apartat es recomana l'ús del plànol de conjunt que s'adjunta als annexos del treball ja que es faran referències als noms, números i descripcions de les peces que apareixen allà. La Fig. 32 pretén aclarir la terminologia i les referències a parts del sistema que s'han utilitzat al llarg de tot aquest apartat.

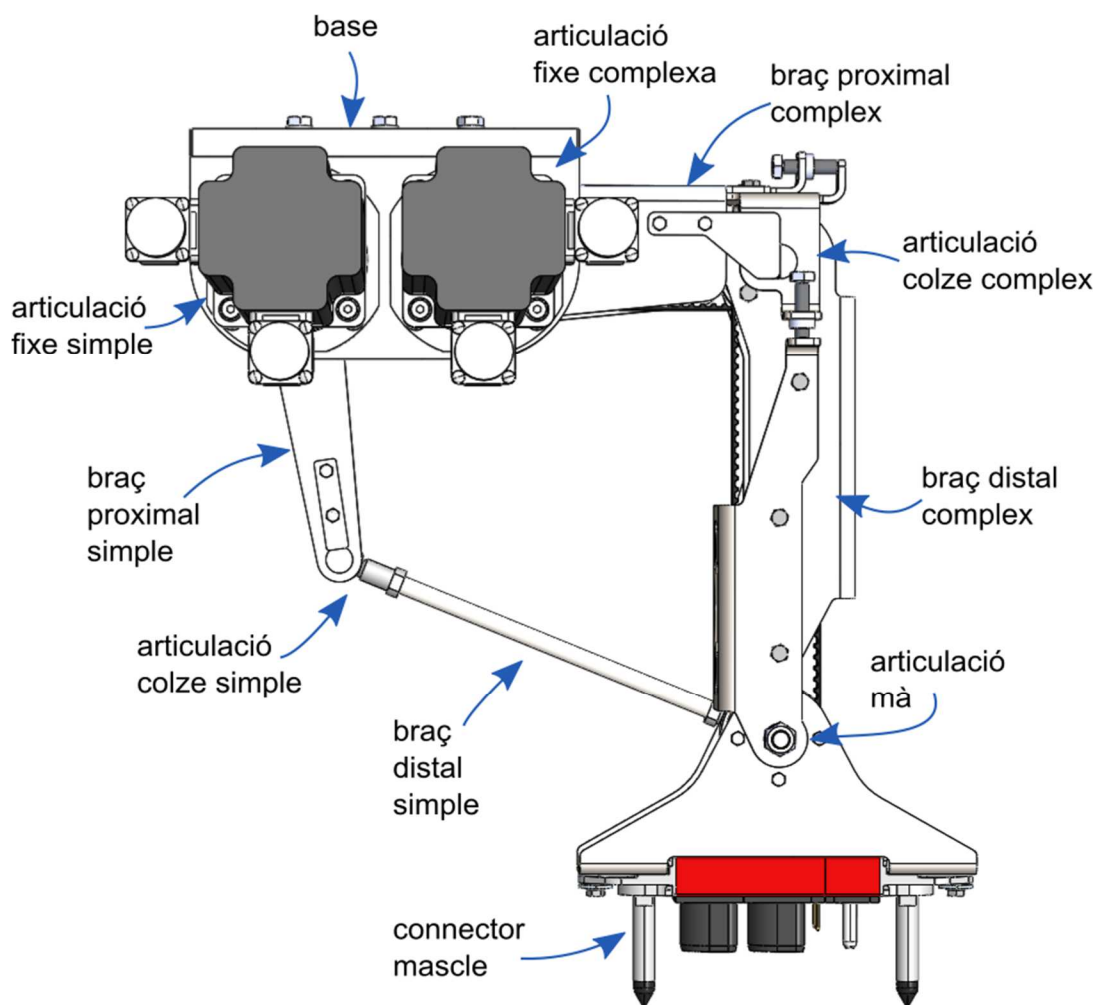


Fig. 32 Vista en planta amb la terminologia del sistema. (Font pròpia)

7.1 Dimensionament general

Per començar en aquest apartat es justificarà l'elecció de les dimensions bàsiques del robot diamant que s'ha escollit i analitzat en els apartats anteriors. Per dimensionar els braços i l'espai entre les articulacions fixes s'han seguit les especificacions del projecte com s'esmenta a continuació. Per tant d'aquest apartat s'obtidran e , l_1 i l_2 definits a la Fig. 25.

Per a poder realitzar aquest dimensionament previ al inici del disseny, s'han triat diferents criteris que es creu que son adequats per el sistema que s'està escollint.

Es busca que el sistema en situació de repòs ocupi el mínim espai possible, tan en la direcció x com en la direcció y , però si se'n ha de prioritzar una d'elles, és la coordenada y perpendicular a la superfície de referència. Cal recordar que el sistema s'està dissenyant per a carregar carretes elevadores, per tant es pot veure que en la coordenada x aquest vehicle sobresortirà i per tant es un espai que igualment no es podria aprofitar.

La zona de treball del sistema ha d'estar prou allunyada de la paret, ja que si aquesta zona és molt propera a la superfície, la maniobra d'estacionament podria ser complicada, fent perdre més temps del necessari al operari.

Considerant que l'angle β és el que existeix entre les parts distal y proximal del mateix braç. Per assegurar una bona transferència de forces de la part proximal (actuada) a la part distal, aquest angle no pot ser proper a 0° ni a 180° .

Com en la zona de forces de connexió és on el sistema requereix una bona transmissió de forces, s'ha buscat que en aquest espai de treball el angle β_{\min} no sigui inferior a 40° i β_{\max} no sigui superior a 115° .

Per altre banda en la zona de moviment, en la que no es fa connexió, aquesta condició no és tant necessària, ja que una mala transmissió de forces es tradueix en un baixa acceleració, la qual cosa no implica un perill per al sistema o un malt funcionament d'aquest.

En la imatge es pot veure com, quan es defineixen les dimensions e , l_1 i l_2 i també s'escull un rang de les variables actuades q_1 i q_2 , queda definit un espai delimitat per quatre cercles de diàmetre $2l_2$ centrats en els punts del rang màxim i mínim de les variables actuades. Per tant l'espai de treball que hem trobat en l'apartat anterior haurà d'estar circumscrit dins de l'espai delimitat per aquets 4 cercles tal i com es veu en la Fig. 33.

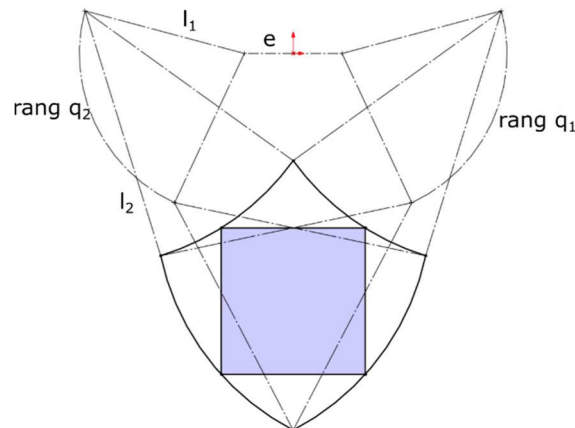


Fig. 33 Espai acotat per el rang d'actuadors. (Font pròpia)

L'espai de treball que s'utilitzarà per definir les dimensions serà aquell en que s'apliquen les forces de connexió.

Per a trobar un combinació adequada de les dimensions s'ha utilitzat el programa SolidWorks, que permet esbossar croquis amb línies rectes i corbes amb relacions geomètriques entre elles.

D'aquesta manera s'ha dibuixat l'espai de forces de connexió de l'apartat "6.5 Espai de treball" circumscrit en els quatre cercles i s'ha forçat que l'angle β del braç de la dreta en el punt de l'espai a la cantonada superior dreta (que es on s'obté el β_{\min} dins de tot l'espai) sigui de 45° ja que aquesta es una de les condicions més crítiques a tenir en compte.

Pel que fa referència al β_{\max} , que per el braç de la dreta està situat al punt inferior esquerra de la zona de treball, s'ha buscat que aquest valor no fos superior a 115° assegurant també una bona transferència de les forces de la part proximal a la part distal.

Una altre de les condicions que s'ha buscat complir és que qualsevol dels dos angles q_i , es a dir la coordenada actuada, no superi un valor màxim de 30° cap a la paret en cap punt de la zona de moviments, això es per evitar que el sistema ocupi molt d'espai en la coordenada y.

Finalment, per facilitar la maniobra d'estacionament a l'operari, s'ha decidit que la cota mínima de la zona de connexió a la paret fos al voltant dels 150 mm.

Amb les condicions que s'han comentat, les dimensions e, l1 i l2 queden completament definides amb els valors 28.52 mm, 130.68 mm i 185.54, respectivament.

A continuació en la Fig. 34 es mostren les condicions que s'han esmentat esbossades en un

croquis del programa SolidWorks. En la imatge es poden veure definits els tres espais de treball, les condicions del angle β en el braç de l'esquerra, la condició dels angles φ_i al braç de la dreta i finalment la cota mínima entre l'espai de connexió i la paret.

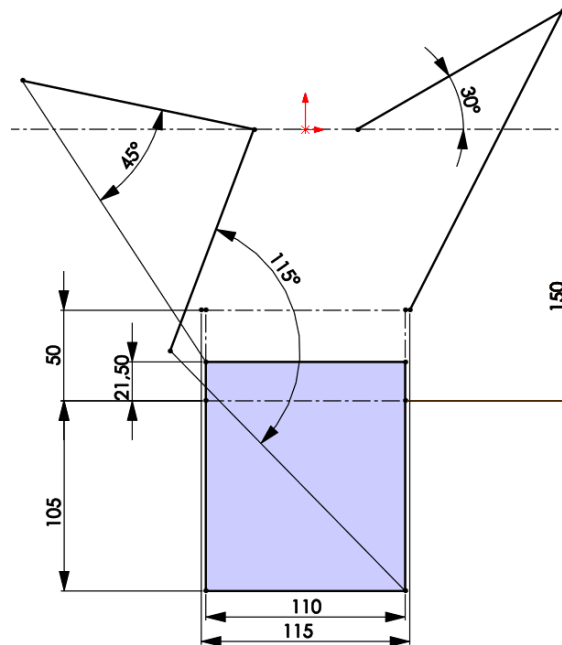


Fig. 34 Condicions inicials del dimensionament (Font pròpia)

Com s'ha comentat al principi d'aquest apartat, aquest es un dimensionament previ al disseny del sistema, això vol dir que tot i que aquestes dimensions escollides s'han intentat respectar, finalment han estat subjectes a canvis deguts al disseny de materialització. Tot i així, en tots aquets canvis que s'han realitzat, s'han tingut sempre en compte els criteris i les condicions que s'ha esmentat en aquest apartat.

Finalment, un cop acabat el disseny, les dimensions son:

- $e = 40 \text{ mm}$
- $l_1 = 133 \text{ mm}$
- $l_2 = 209 \text{ mm}$

De manera que les condicions imposades sobre angles i cotes amb aquestes dimensions finals tenen els valors que es poden veure a la següent imatge.

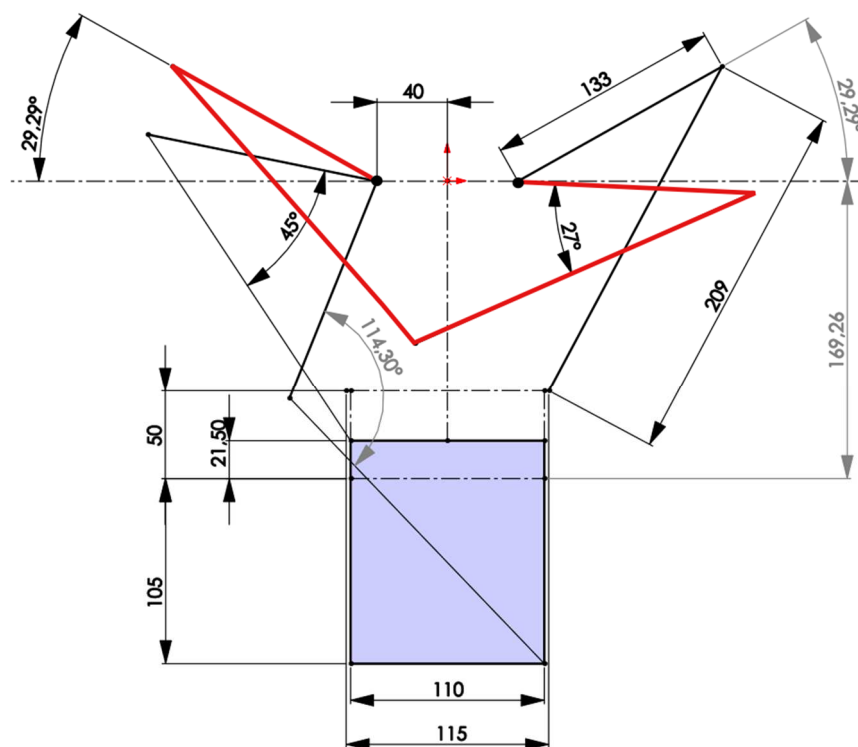


Fig. 35 Dimensionament final i posició de repòs (Font pròpia)

En la Fig. 35, a més de poder veure les dimensions, condicions i criteris, s'ha mostrat en vermell la posició de repòs del sistema.

Aquesta posició s'ha escollit buscant que l'articulació de la mà del sistema estigui el més allunyada possible de la zona de connexió, d'aquesta manera es minimitzarà la possibilitat que el connector rebi algun cop durant l'estacionament del vehicle elèctric.

Aquesta posició ha estat escollida un cop s'ha finalitzat el disseny complet del sistema. Com es veu en la Fig. 35, en la posició de repòs l'angle q_2 del braç esquerra fa que l'angle entre el braç i la paret estigui en el seu valor màxim permès de 30° . Per allunyar el màxim possible l'articulació de la mà de la zona de treball, el mateix criteri s'hauria d'aplicar al braç dret, però degut a que aquest braç conté el sistema de politges que permet el control de la coordenada α , el seu disseny es molt més complex que el del braç esquerra i en conseqüència, el angle β_{\min} que pot existir entre les parts proximal i distal d'aquest braç sense que hi hagi col·lisió entre les seves peces es de 27° . Amb aquests dos angles, la posició de repòs queda completament definida.

Com es pot veure a la imatge anterior, un cop definides les dimensions, els diferents espais de treball també queden definits respecte al pla que conte les eixos dels actuadors. Aquesta es una

informació important ja que aquests espais es faran servir per a realitzar càlculs.

Així doncs els espais queden definits per els següents rangs de les coordenades x / y , sent l'origen el punt mig entre els eixos dels actuadors i (x/y) les coordenades de l'articulació de la mà.

- Zona de connexió

$$x \in [-52.5 ; 52.5] \quad , \quad y \in [-274.26 ; -169.26] \quad (38)$$

- Zona de moviment

$$x \in [-57.5 ; 57.5] \quad , \quad y \in [-274.26 ; -119.26] \quad (39)$$

- Zona de forces de connexió

$$x \in [-55 ; 55] \quad , \quad y \in [-274.26 ; -147.76] \quad (40)$$

7.2 Actuadors del robot de diamant

Per a seleccionar els actuadors que mouran els braços del robot diamant, s'han tingut en compte les forces que es poden generar sobre el connector de l'articulació final per a realitzar la connexió dins de tota la zona de forces de connexió definida a l'apartat 7.1.

Aquets actuadors escollits han de poder incorporar-se en un llaç tancat de control, per tant hauran de ser servomotors que incorporin un encorder en el seu interior o que tinguin la opció de incorporar-lo.

També és important que els actuadors escollits siguin compactes, minimitzant així l'espai ocupat.

A la sortida de l'eix del motor es pot utilitzar un reductor que permeti augmentar el parell, però el final l'eix, que queda lliure per acoblar el sistema, ha de ser llis. Ja que, com s'ha comentat a les especificacions, el disseny es un prototip i per tant és interessant que es pugui acoblar a diferents tipus de peces.

Com es pot veure a la taula d'especificacions, en aquest projecte el temps que triga el sistema en realitzar la connexió, no es un requeriment. Es per això que per dimensionar els actuadors es farà amb les forces estàtiques que es requereixen per realitzar la connexió.

Per conèixer els parells que es requereixen per als actuadors del sistema de diamant s'ha de

resoldre el sistema d'equacions (28) de l'apartat “

6.3 Anàlisi de forces estàtiques” Definint els paràmetres e , l_1 i l_2 amb els valors 40 mm, 133 mm i 209 mm respectivament. Aquest sistema d'equacions depèn de la configuració del sistema per tant caldrà calcular per a cada una de les posicions de la zona de forces de connexió definida a l'apartat “7.1 Dimensionament general” el parell que haurà de produir cada actuator per a poder realitzar la connexió.

El espai de forces de treball esta definit en les coordenades x , y i α , mentre que el sistema d'equacions (28) depèn dels angles del sistema, per tant caldrà utilitzar les equacions (16) de l'apartat “6.1 Anàlisi geomètric” per a definir els angles del sistema per a cada posició de la zona.

A l'apartat de l'annex “Càlcul de forces estàtiques del sistema” es pot veure un càlcul més detallat i els resultats de manera més extensa.

Finalment el parell màxim obtingut dins la zona de forces de connexió es de 8.58 Nm.

Tenint en compte les consideracions i el parell màxim dins la zona de forces connexió de 8.58 Nm que s'ha trobat, primerament es va proposar el motor BRS3.

El motor BRS3 és un motor pas a pas (Schneider Electric, s.d.) en el que el fabricant permet una certa personalització com el fet de instal·lar un encoder, el tipus d'eix de sortida o l'opció de tenir un fre quan el motor es troba apagat. La configuració escollida per aquets motor va ser BRS368H131FCA prestacions les quals es poden veure el la fitxa de l'annex “selecció motor sistema diamant”.

El parell màxim que ofereix aquest motor es de 1.5 Nm, és per això que requerirà d'un acoblament a la sortida per a poder aconseguir el parell desitjat. El mateix fabricant ofereix una ample gamma de reductors planetaris i kits d'acoblament per a poder-los instal·lar a la sortida dels actuadors. El reductor escollit que permet complir l'especificació de les càrregues es el GBX060012K amb reducció 9:1. Es va considerar aquesta parella motor/reductor, perquè en aquest projecte, els temps que triga el sistema en realitzar la connexió no es una condició crítica, per això s'ha utilitzat un rati de reducció considerable.



Fig. 36 Motor pas a pas BRS3. (Schneider Electric, s.d.)

Finalment aquesta opció es va acabar descartant per la longitud de la suma de tots els components que acabava sent de 210 mm.

Descartada aquesta primera opció es va buscar doncs, un actuator amb més densitat de potència.

Els servomotors de corrent alterna permeten obtenir parells molt superiors al nominal durant curts períodes de temps, és per això que finalment s'ha escollit un d'aquest tipus.

Els servomotors de Movinor N (Infranor, 2021) ofereixen un gran rang de parells i longituds. El resolver també està incorporat dins del servo i l'eix de sortida es llis. Degut als alts parells de pic que ofereixen aquests actuadors, no es necessari la utilització de reductors a la sortida de l'eix per a complir les especificacions de les forces. Aquest parell de pic, assegura el fabricant, que es pot mantenir fins a 5 segons sense que afecti al correcte funcionament del servo, en aquest 5 segons el sistema ja haurà tingut temps suficient per a realitzar la connexió.

El model escollit ha sigut el LN064-5 que presenta un parell de pic de 11.4 Nm que és superior als 8.58 Nm que s'ha calculat. El motor pot suportar aquest parell durant temps inferiors a 5 segons sense cap conseqüència. Més informació d'aquest component es mostra a l'annex "Selecció del motor del sistema de diamant". La longitud d'aquest motor es de 188 mm el qual presenta una reducció respecte a l'actuator anterior.

Pel que fa referència a les forces dinàmiques i els temps de connexió utilitzant aquest servomotor, a l'annex "Càlcul de forces dinàmiques del sistema" es demostra de manera simplificada que utilitzant aquest servo els temps que es triga en realitzar la connexió és al voltant dels 0.3 segons sense tenir en compte el sistema de control.

Per tot això, es conclou que aquest servo motor es vàlid per a complir la funció que es requereix.

Els actuadors comentats ens aquest apartat fan referència a les peces 75 del plànol de conjunt.



Fig. 37 Movinor LN. (Infranor, 2021)

7.3 Actuator sistema de politges

Per a decidir el actuator del sistema de politges s'han tingut en compte les toleràncies angulars a l'hora de la connexió entre les dues parts mascle i femella que venen donades per el fabricant Staübli. També s'ha considerat, com s'ha comentat a les especificacions, un descentrament i desalineament de les forces de connexió.

El descentrament es suposa que ve donat per el mal funcionament del sistema. El connector mascle conte dues columnes de guiat al seus extrems mentre que el connector femella en els seus extrems hi té dos forats en forma de con que permeten el centratge dels dos connectors. Si el sistema de control falla i la connexió no és precisa, la columna de guiatge tocarà el la superfície del con abans de realitzar la connexió. Tot i que aquest descentrament apareix sobre el connector femella es considera el mateix descentrament en el connector mascle que genera un parell a l'eix de l'articulació de la mà.

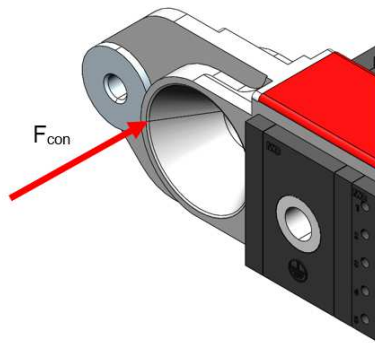


Fig. 38 Descentrament de la força de connexió. (Font pròpia)

Pel que fa referència al desalineament de la força es considerarà que el sistema de politges no ha funcionat correctament i la força de connexió no es en la direcció de l'eix de la mà. El desalineament que s'ha considerat en aquest cas es el valor màxim que pot prendre el grau de llibertat α , que es de 5.14° .

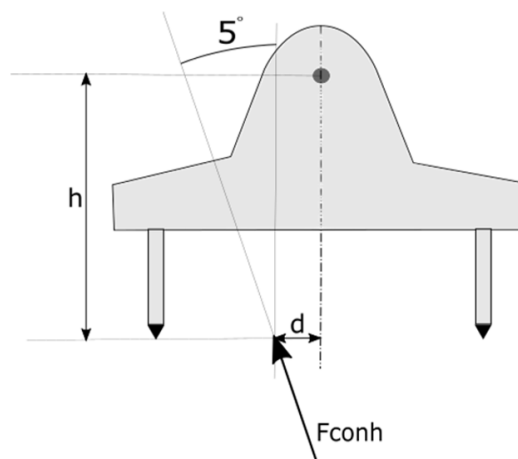


Fig. 39 Descentrament i desalineament de la Força de connexió (Font pròpia)

Amb aquestes dues consideracions, a l'apartat de l'annex "Càlculs sistema de politges" s'ha trobat que el parell que haurà de generar el actuador es de 2.47 Nm.

En aquesta situació s'ha decidit utilitzar un motor elèctric pas a pas, ja que el parell a generar és molt inferior que en l'altre cas.

El model escollit es el motorreductor ARM46AC-PS36 (Oriental Motor, s.d.) que incorpora un encoder i un reductor planetari de rati 36. Aquest motorreductor té un parell admissible 3 Nm i puntualment pot arribar als 6 Nm fins a 83 min^{-1} . La resolució que ofereix es de $0.01^\circ/\text{pols}$ i té un retrocés de 0.25° .

Aquestes especificacions del motor son acceptables per les toleràncies que té el connector en

el moment de l'acoblament i els càlculs realitzats respecte al descentrament de les forces. Aquest actuator està indicat amb el numero 2 en el plànol de conjunt

7.4 Sistema de politges i corretges

De la manera que s'ha comentat en el disseny conceptual, les corretges i politges utilitzades en el sistema han de ser síncrones per evitar el lliscament. En aquest disseny s'ha buscat que els ratis de velocitats entre les politges fos igual a 1 ja que no es necessari augmentar el parell o la velocitat del actuator, i un rati diferent de la unitat hagués induït forces desalineades en el sistema. El tipus de corretja utilitzada en aquest cas ha sigut la corretja síncrona ZR, segons la ISO 5296 i les politges del mateix tipus segons ISO 5294. (Optibelt, s.d.)

Per a escollir el perfil de la politja s'ha suposat una velocitat de rotació de $\pi/2$ rad/s, justificat en l'annex a l'apartat "Càlculs sistema de politges", i utilitzant els 2.47 Nm de parell de l'apartat anterior es troba una potencia a transmetre de 3.9 W. Veien la Fig. 40 es pot veure que el punt cau la cantonada inferior esquerra, on coincideixen les zones dels perfils XL i L.

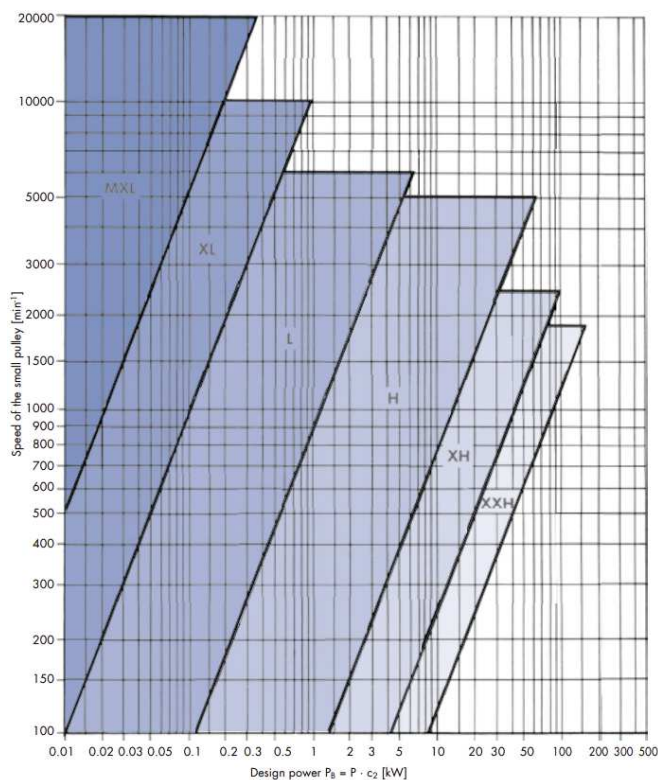


Fig. 40 Zones dels perfils de corretges ZR. (Optibelt, s.d.)

Finalment s'ha decidit utilitzar el perfil XL que s'ha validat en els càlculs de l'annex amb una

amplada de $b=9.53$ mm.

Per escollir el nombre de dents de les politges, es a dir el seu diàmetre, s'ha tingut en compte la recomanació del fabricant Optibelt, que afirma que per el correcte funcionament sense lliscament entre politja i corretja, com a mínim hi ha d'haver 6 dents encaixades, per tant al tractar-se d'un sistema de rati 1 la politja haurà de contar com a mínim amb 12 dents. Més enllà d'aquesta recomanació s'ha buscat trobar un compromís entre la reducció de l'espai utilitzat per el sistema de politges i els components que hauran de tenir dins aquestes peces, com per exemple acoblaments a eixos o rodaments.

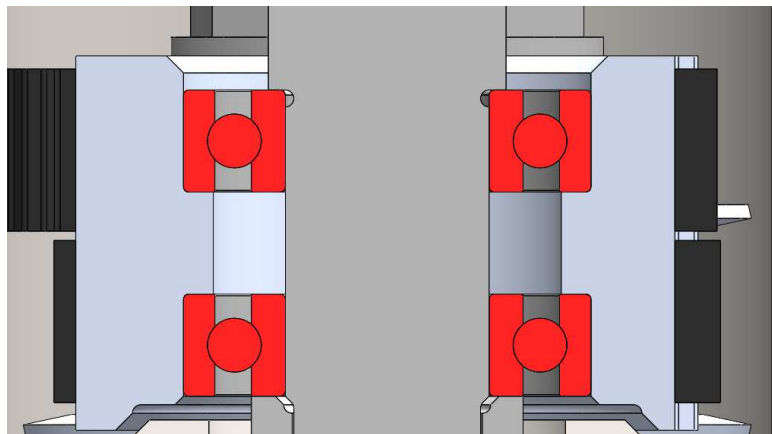


Fig. 41 Rodaments interiors a la politja de l'articulació del colze. (Font pròpia)

Tot i que el tensat previ en sistemes de corretja síncrona no es gaire estricte, el fabricant recomana que es tingui en compte un recorregut per a tensar la corretja o una politja de tensat. El valor de la distància d'ajust entre eixos de les politges que recomana el fabricant es de $x=0.004 \cdot a_{nom}$ sent a la distància nominal entre els eixos.

El fabricant també recomana que de les dues politges, la que genera el parell i la que el rep, almenys una conti amb pestanyes per evitar que es surti la corretja de la politja axialment (Optibelt, s.d.).

Amb totes aquestes consideracions, recomanacions del fabricant i càlculs de l'annex, s'han escollit politges perfil XL de 23 dents i diàmetre efectiu de 37.19 mm.

Les dimensions de les corretges que ofereix el fabricant que més s'ajusten al dimensionament inicial esmentat a l'apartat 7.1 d'aquest document es mostren en la següent taula.

Corretja	Perfil	b	Longitud	N. dents	a	$x=0.004 \cdot a$	N. Conjunt
Proximal	XL	9.53 mm	380 mm	75	132.08 mm	0.53 mm	83
Distal	XL	9.53 mm	533.4 mm	105	208.28 mm	0.83 mm	84

Taula 4 Dimensions corretges ZR seleccionades.

El recorregut x per a tensar les corretges serà una condició a tenir en compte a l'hora de dissenyar el braç que conté el sistema de politges.

Pel que fa la fabricació de les politges, el fabricant Optibelt ofereix barres d'alumini amb el perfil desitjat, de manera que es poden mecanitzar per aconseguir les dimensions i formes que es requereixin.

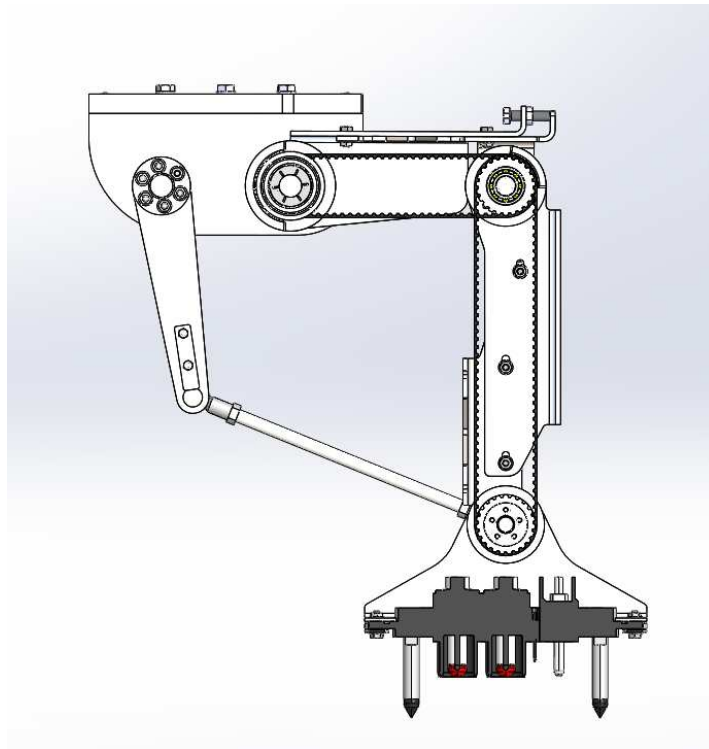


Fig. 42 Secció en planta del disseny final, sistema de politges. (Font pròpia)

En la figura Fig. 42 es pot veure el sistema de politges que va per l'interior del braç dret. La politja de l'articulació fixe (superior esquerra i peça 15 en el plànol de conjunt) i la politja de l'articulació de la ma (inferior dreta i peça 43 en el plànol de conjunt) disposen de pestanyes que eviten el lliscament axial entre politja i corretja. La politja de l'articulació del colze (superior dreta i peça 31 en el plànol de conjunt) es compartida entre els dos sistemes de manera que les dues corretges,

proximal i distal, l'envolten per la part inferior i superior respectivament, com es pot veure a Fig. 41.

En aquest apartat únicament s'ha comentat el sistema de poltges independentment de la resta del sistema. Els detalls de la mecanització de les parts interiors de les poltges, el seu posicionament axial en els eixos i la solució que permet tensar les corretges es detallaran quan es justifiquin parts que contenen aquestes peces.

A l'apartat de l'annex "Càlculs sistema de poltges" es realitzen les comprovacions pertinents i a l'apartat "Càrregues mínimes dels rodaments mà" s'ha definit un valor de les forces de tensat de les corretges per el correcte funcionament del sistema.

7.5 Acoblament dels actuadors

En aquest apartat es mostra la solució proposada per a transmetre el parell dels actuadors escollits cap els eixos o peces. També es presenta la solució per a fixar els actuadors a la base.

Els números de les peces que es presenten en aquest apartat son: suport actuator superior (5), suport actuator inferior (1) i els acoblaments flexibles (6, 4 i 85)

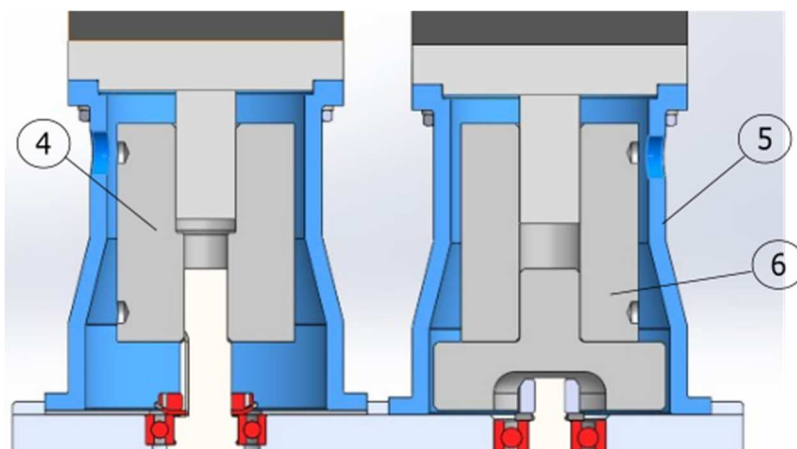


Fig. 43 Secció alçat, acoblaments flexibles i suports auxiliars superiors. (Font pròpia)

També es comenta la solució per acoblar i posicionar el actuator del sistema de poltges, ja que la solució utilitzada ha estat molt semblant.

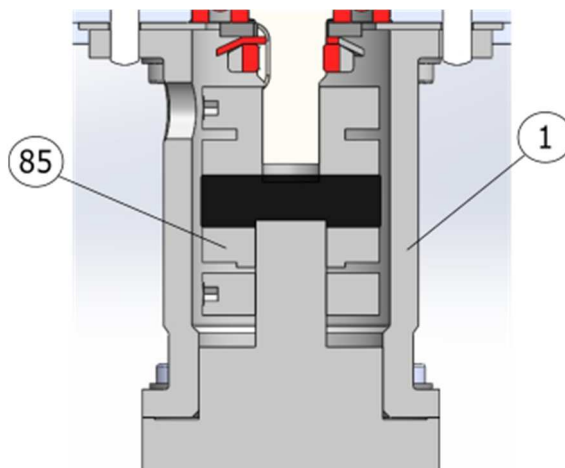


Fig. 44 Secció vista alçat, acoblament flexible i suport actuator inferior. (Font Propia)

Acoblaments flexibles

Per a transmetre el parell dels actuadors al sistema s'ha escollit la utilització d'acoblaments flexibles que permeten un cert desalineament i descentrament entre l'eix de sortida i l'eix d'entrada.

Inicialment es va plantejar la possibilitat que fossin els eixos dels actuadors els suportessin les càrregues del sistema. Degut al elevat cost del actuadors aquesta possibilitat es va descartar i es va decidir col·locar els acoblaments flexibles que permeten tenir toleràncies més amples a l'hora de posicionar els actuadors i aïllen els eixos d'aquets components de les càrregues radials del sistema, sempre que l'eix de sortida de l'acoblament flexible estigui degudament suportat.

Entre tots els tipus d'acoblaments flexibles s'ha escollit el tipus OLDHAM (HUCO, s.d.). aquest tipus de acoblaments presenten 3 parts, dues d'elles d'alumini i un anell d'elastòmer que els uneix. L'anell d'elastòmer permet que entre les peces d'acer que fixen els eixos existeixi una certa elasticitat que permeti desalineaments o descentraments.



Fig. 45 Acoblament flexible Oldham. (HUCO, s.d.)

S'ha escollit aquest tipus de acoblament elàstic ja que presenta bones característiques i durabilitat en sistemes que treballen amb parades i arrancades, canvis de sentit de la rotació i

possibles xocs.

Per fixar l'acoblament elàstic als eixos es fa per mitja d'un cargol radial que permet prémer la peça d'acer contra l'eix. El fabricant ofereix la possibilitat de canviar a demanda el forat per als eixos d'entrada i sortida del acoblament.

La mida escollida es la 41. El tipus de disc es d'acetal amb el que s'han realitzat els càlculs de l'annex. S'ha escollit amb un forat passant a través del disc per a reduir l'alçada total del sistema, tot i que es veu afectada la rigidesa torsional del component. Per collar s'escullen els cargols radials. Els diàmetres escollits per l'acoblament de la dreta (braç de les politges i peça 6 en el plànol de conjunt) son 14 mm tant a l'entrada com a la sortida, en canvi el braç de l'esquerra (peça 54 en el plànol) a la sortida el forat serà de diàmetre 10 mm.

El parell de pic que aquest component pot transmetre es de 17 Nm que superior als 8.58 Nm que es requereix.

Una altre característica d'aquest component que també cal comprovar és la rigidesa torsional del acoblament, que pot induir errors de posicionament en el sistema. Aquesta rigidesa no es important en el moment de la connexió, ja que les columnes de guiat ja son dins els forats del connector femella quan aquestes forces apareixen. Però si caldrà tindre-les en compte en el moment en el que el sistema es mou. Com s'ha comentat a l'apartat "7.2 Actuadors del robot de diamant" el moviment del sistema es realitza amb parell nominal de 2 Nm del actuator.

L'error angular que hi ha a la sortida del acoblament és de 0.096° . Per saber com afecta aquest angle al posicionament del capçal s'ha de calcular en quin punt i direcció, les velocitats són màximes en el capçal, ja que aquest serà el punt en el que el sistema es vegi més afectat per els 0.096° . Finalment el valor de l'error màxim que es cometrà per l'efecte d'aquest angle és de 0.37 mm, el qual és acceptable en comparació amb les toleràncies del connector.

Es poden veure els càlculs en detall a l'apartat "Acoblament elàstic sistema de diamant".

A l'acoblament flexible inferior els parells a transmetre i les dimensions han de ser diferents.

La mida escollida és 25 que pot transmetre un parell de 4 Nm. Pel que fa a la resta de propietats són iguals que en l'acoblament elàstic escollit per els altres dos actuadors. Forat passant, disc d'acetal i cargols radials. El forat per la part de l'eix de l'actuator serà de 10 mm i per l'altre de 8mm.

A l'apartat de l'annex "Comprovació Motor pas a pas i acoblament elàstic" es justifica el mida de l'acoblament per mitjà de les forces que ha de transmetre.

El numero de peça per identificar l'acoblament elàstic inferior es el 85

A la Fig. 43 i Fig. 44 es pot veure una representació dels acoblaments flexibles en el model.

Suports auxiliars superiors

Aquestes peces marcades en blau a la Fig. 43 son idèntiques. Son les peces encarregades de posicionar els actuadors i fixar-los a la base per que aquests puguin transmetre el parell.

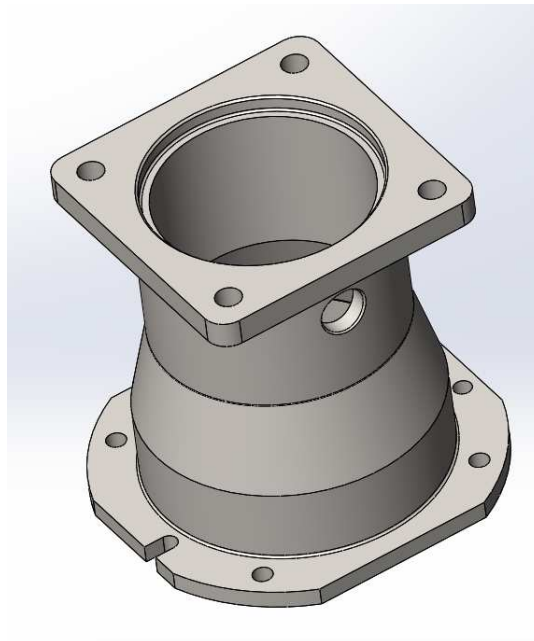


Fig. 46 Suport auxiliar superior. (Font Pròpia)

Aquesta peça permet protegir les parts mòbils del seu interior com ara els eixos o l'acoblament flexible.

A la part superior s'hi colla el actuator de brida 64x64mm amb 4 cargols M5. La cara de la brida del actuator fa contacte amb la cara superior de la peça i el centratge es fa amb la primera superfície circular interior. La part inferior es posiciona respecte a la base amb dos passadors de diàmetre 4, un a través de un forat i l'altre a través d'una ranura per no causar redundàncies. Els passadors son amb ajust mitjà a la base i ajust lleuger a la peça de suport en el forat i ajust lliscant a la ranura. Va collat a la base amb 4 cargols M4, forat passant a la peça de 4.5 mm i forat roscat a la base.

Al lateral de la peça ha un forat que permet fixar l'acoblament flexible a l'eix del motor un cop la peça ha estat posicionada a la base i l'eix del motor s'ha introduït en la seva posició.

La peça es tornejada i posteriorment fresada a partir d'acer E295.

Aquesta peça es representa amb el numero 5 en el plànol de conjunt.

Suport auxiliar inferior

Aquesta peça té la mateixa funció que el suport auxiliar superior però esta adaptada a les dimensions de l'actuador del sistema de politges.

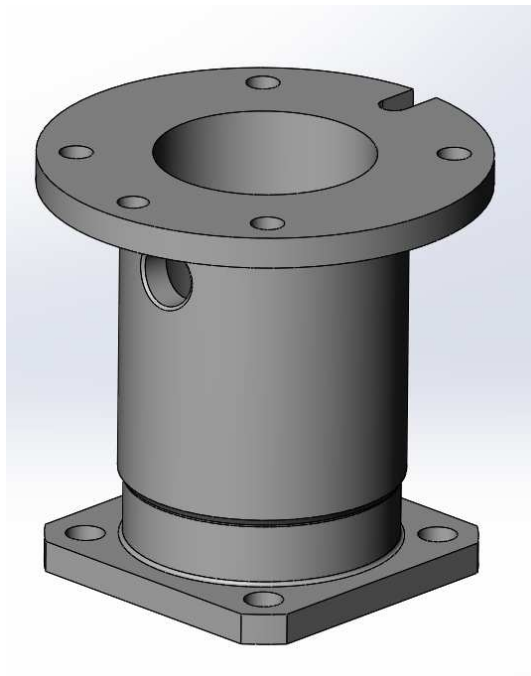


Fig. 47 suport auxiliar inferior. (font pròpia)

El funcionament es idèntic a la peça comentada en l'apartat anterior. Per la part del actuador s'adapta a la brida a amb forats passant per a 4 cargols M4 i per la part de la base es referencia mitjançant 2 passadors un a través de un forat i l'altre a través de una ranura. També disposa del forat lateral per fixar l'acoblament elàstic a l'eix.

La peça també es tornejada i posteriorment fresada a partir d'acer E295

7.6 Base del sistema

La base del sistema està formada per tres peces fresades d'alumini 7075 de gruix 12 mm. S'ha escollit aquest material ja que es requereix una resistència elevada però també és interessant que la densitat sigui baixa, ja que són les peces més voluminoses del sistema i l'acer augmentaria el pes de tot el prototip.

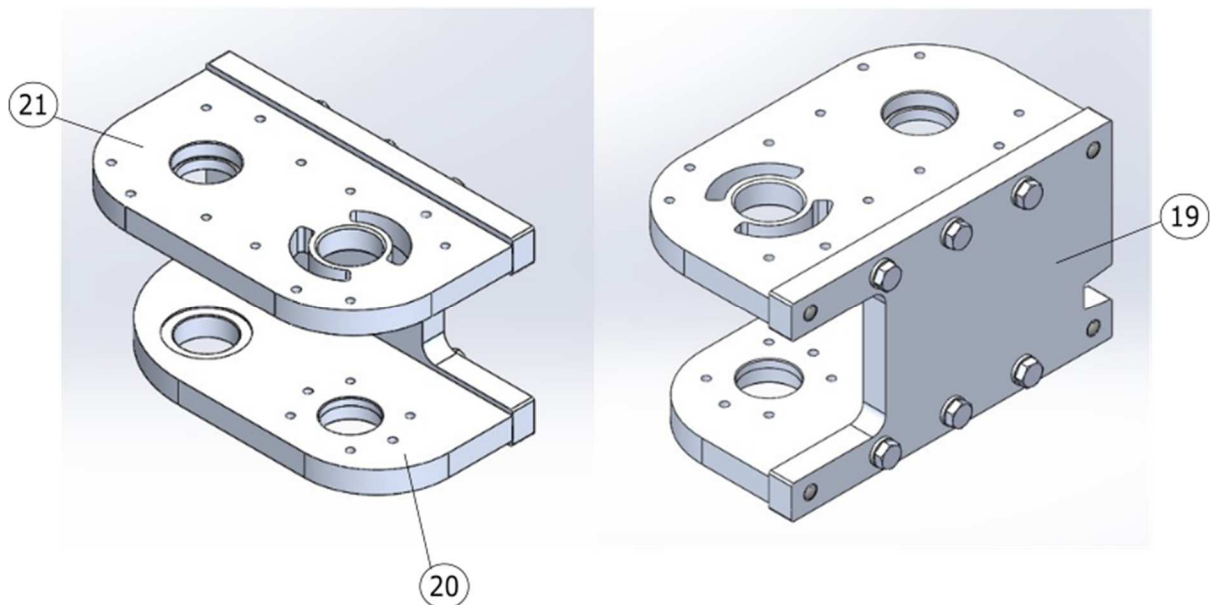


Fig. 48 Vistes isomètriques anterior (esquerra) i posterior (dreta) de l'assemblatge de la base. (Font pròpia)

La peça base vertical (19) es la que es fixarà a la superfície de referència per la seva part posterior.

Les peces transversals superior (21) i inferior (20) seran les encarregades de fixar, suportar i referenciar totes les peces pertanyents a les articulacions fixes.

Per a posicionar les peces transversals respecte la base vertical s'utilitzaran dos passadors horitzontals per a cada una de les peces. Aquest passador estarà muntat amb ajust premsat a la peça vertical i ajust forçat dur a les peces horitzontals. Es requereixen toleràncies ajustades en aquests posicionaments, ja que seran les peces transversals les que suportaran els eixos de les articulacions fixes. Els passadors seran acanalats per permetre la correcta inserció en el forat cec de la peça transversal.

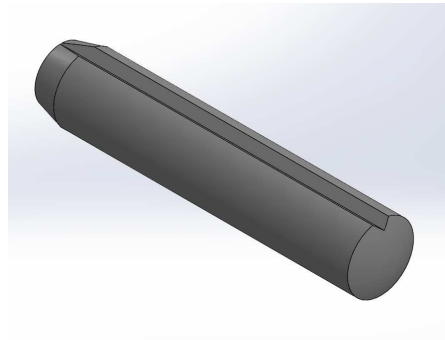


Fig. 49 Passador acanalat DIN 1473. (Font pròpia)

Per collar les peces transversals a la vertical s'utilitzaran 3 cargols de cap hexagonal M6 segons DIN 933.

S'hauran de mecanitzar entalles en la peça vertical per a permetre el rang de moviment descrit en l'apartat 7.1 Dimensionament general" de 30° de les parts proximals dels braços en la direcció posterior.

A les peces transversals superior i inferior es mecanitzaran forats amb les formes i toleràncies adequades per a contendre-hi els rodaments que suportaran els eixos. Aquestes formes es comentaran amb més detall en els apartats de les respectives articulacions.

A la peça transversal superior s'hi fresarà dues ranures de forma circular incompletes que permetran a través de dos passadors la transmissió de parell des de l'actuador superior del sistema diamant al braç proximal complex. Les ranures cobriran l'angle suficient com per que el servomotor pugui actuar dins de tota la zona de moviment definida a l'apartat "7.1 Dimensionament general" addicionant un cert angle de seguretat per evitar col·lisions. Aquest mecanisme de transmissió de parell es detallarà a l'apartat "7.7 Articulació fixe del braç complex".

Els forats de les peces per a collar i referenciar les peces de suport auxiliar dels actuadors seran passants, els que requereixin cargols roscats amb M4 i el dels passadors amb ajust mitjà.

7.7 Articulació fixe del braç complex

Aquesta articulació té dos moviments independents actuats per el servomotor del sistema de diamant del braç complex (75) i el actuador del sistema de politges (2).

Les peces principals que formen part d'aquesta articulació son: politja articulació fixe (16), acoblament politja (15), parella de rodaments exteriors (22,23), parella de rodaments interiors (13,14), roda de l'articulació fixe (8), eix fixe complex (9), braç proximal complex (26), base fixe (19), base inferior (20), base superior (21) i transmissor de parell (7).

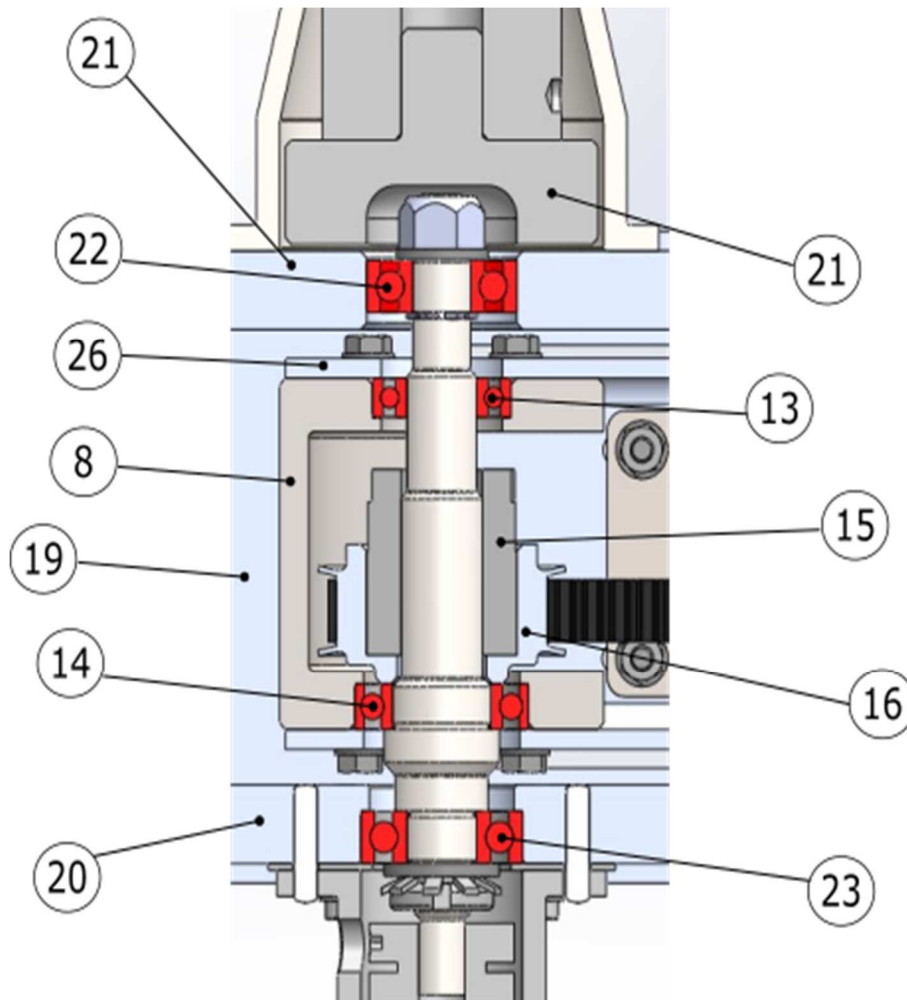


Fig. 50 Secció alçat articulació fixe braç complex (Font pròpia)

Funcionament General

La politja d'aquesta articulació (16) gira solidaria a l'eix (9) per l'acció d'un acoblament de bloqueig amb femella central (15) (Norelem, s.d.).

Inicialment es va considerar l'ús d'una claveta per a la transmissió de parell, però es va descartar degut a la naturalesa del mecanisme, que té parades i canvis de sentit. Això provocaria petits impactes entre la claveta i la politja d'alumini i la podria malmetre.

L'ús d'aquest component presenta avantatges com per exemple la capacitat per centrar l'eix i la politja, el retrocés o joc nul entre politja i eix o la capacitat que té el component per a suportar càrregues axials que s'ha aprofitat per fixar un dels rodaments de l'eix.

L'eix per la part inferior es fixe a l'acoblament flexible inferior (85) i per tant rep el parell de l'actuador del sistema de politges (1). Aquest eix es suportat per una parella de rodaments en disposició lliure/fix (22 ,23)

Per poder complir les dues rotacions independents del braç proximal complex i la politja, la roda de l'articulació fixe (8) girarà lliurement al voltant de l'eix d'aquesta articulació (9) amb una parella de rodaments entre roda i eix (13 superior i 14 inferior).

Per a poder transmetre el parell de l'actuador superior (75) cap al braç proximal (26) mantenint el rodament superior (22) entre l'eix i la base, s'ha decidit aprofitar el rang acotat de moviment del braç proximal, que es més petit que 180° , més concretament la suma de 29.9° i 68.09° com s'ha demostrat a l'apartat 7.1, per tant un valor total de 97.5° .

La solució que es proposa, és mecanitzar dues ranures a la base superior (21), per la part exterior del forat on hi ha el rodament superior de l'eix (22). Aquestes ranures tindran forma circular de manera que permetran el moviment al voltant de l'eix de dos passadors excèntrics (82) situats a una certa distància de l'eix. A continuació, a la Fig. 51, es mostra per mitjà d'un croquis en el programa SolidWorks, les dimensions que hauran de tenir aquestes ranures.

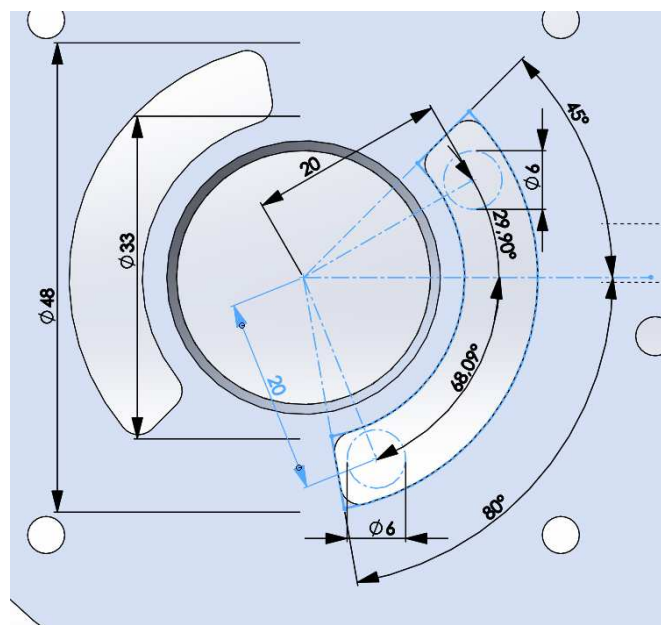


Fig. 51 Planta dimensions ranures base superior. (Font pròpia)

Per a decidir la distància entre l'eix de l'articulació i els passadors s'ha buscat un compromís

entre l'espai ocupat per aquest sistema, la mida de l'eix i rodament de la part interior de la ranura i les tensions generades en els passadors que transmetran el parell. Els passadors seran de diàmetre 6 mm i estaran desplaçats respecte al centre 20 mm.

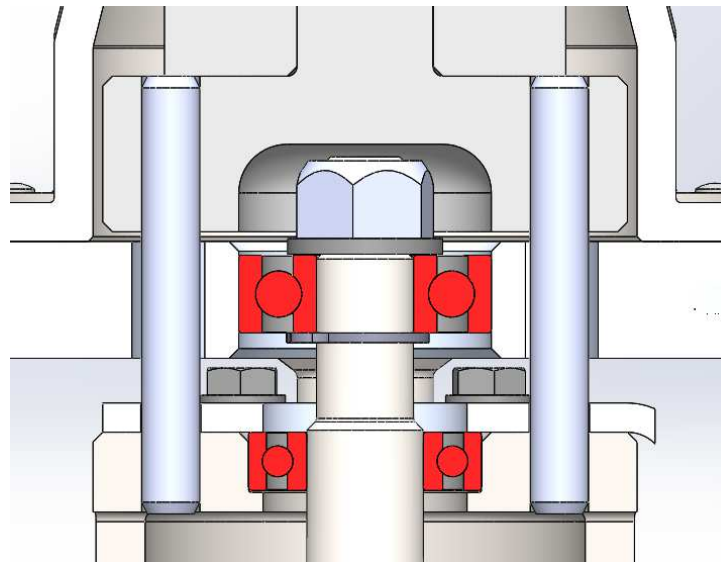


Fig. 52 Secció vista lateral passadors (Font pròpia)

Per a connectar la sortida del acoblament elàstic (6) als passadors (82) es requereix d'una peça auxiliar (7) que transmeti el moviment a la parella de passadors. Aquest transmissor de parell que serà fixe a l'acoblament elàstic tindrà mecanitzats dos forats de 6 mm a la mateixa distància que ho estan les ranures de 20 mm. L'ajust entre passador i la peça es farà amb premsa, ja que aquestes peces es poden muntar amb facilitat fora del sistema i després incorporar-les.

Per la part inferior el passador s'introdueix en un forat de la roda de l'articulació fixe (8) aquesta vegada amb un ajust mitjà. Finalment serà aquesta roda estarà collada al braç proximal (26) per la seva part inferior i superior i li transmetrà el moviment.

Les cotes que posicionen els forats dels passadors hauran d'estar mecanitzades amb toleràncies precises garantint els ajustos desitjats i possibilitant el muntatge dels passadors.

Per a calcular els passadors s'ha, considerat l'aixafament de les superfícies, l'esforç tallant sobre el passador i també la flexió sobre aquets, ja que al haver-hi una certa distància entre les superfícies de contacte es genera un moment flector sobre els passadors.

La torsió que s'ha considerat a transmetre és en una situació de mal funcionament del sistema en el que, per causes externes, s'arriba al parell màxim que l'acoblament flexible pot transmetre de 17 Nm (HUCO, s.d.).

Finalment s'ha descobert que l'acció més crítica és la del moment flector, obtenint unes tensions a la superfície del passador de 485 MPa. Per a que el passador pugui suportar aquestes tensions serà d'acer endurit f155 amb la superfície rectificada que reduirà els efectes de la fatiga. Amb totes aquestes suposicions el valor del factor de seguretat a fatiga del passador es de 1.27.

A l'apartat de l'annex "Passadors braç complex" es demostra la validesa de les tensions i fatiga dels passadors i les peces en les que connecten.

Rodaments eix/base

Aquesta parella de rodaments (22 i 23) permet girar l'eix respecte la base minimitzant la fricció i en conseqüència millorant la precisió del sistema de politges.

Els rodaments d'aquesta parella, com els de tot el sistema, son rodaments rígids per que , com es pot veure a l'apartat de l'annex "Viabilitat rodaments articulació fixe", les càrregues axials que s'obtenen no son elevades.

Com s'ha comentat a l'apartat anterior, els rodaments estan en disposició fix/lliure, ja que aquesta disposició permet tenir més precisió que la flotant i l'eix queda fixat axialment respecte un dels rodaments.

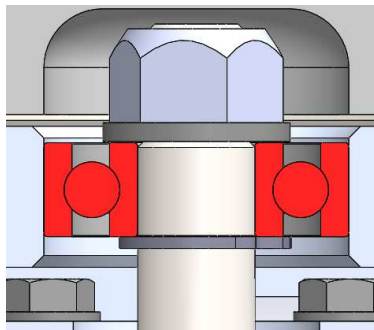


Fig. 53 Rodament superior 22. (Font pròpia)

A la Fig. 53 es pot veure el rodament lliure de la disposició. Com es pot apreciar en els càlculs de l'annex "Viabilitat rodaments articulació fixe", en la referència fixe a l'eix i en la referència fixe a la base, les càrregues sobre el rodament canvien de direcció, per tant, la pista interior i exterior hauran de tenir un petit ajust de interferència amb l'eix i la base respectivament. Aquesta petita interferència evitarà que les boles del rodaments laminin les pistes, tot i que en aquest cas, on les càrregues són baixes respecte les nominals del rodament és improbable que succeeixi. És per això que com es requereix un ajust poc exigent, el rodament rígid de boles és adequat. (SKF, 2019).

Per a bloquejar el moviment axial del rodament respecte l'eix s'ha decidit utilitzar una femella autoblocant DIN 985 amb una volandera DIN 125 per la part superior i un anell elàstic DIN 471 a la part interior.

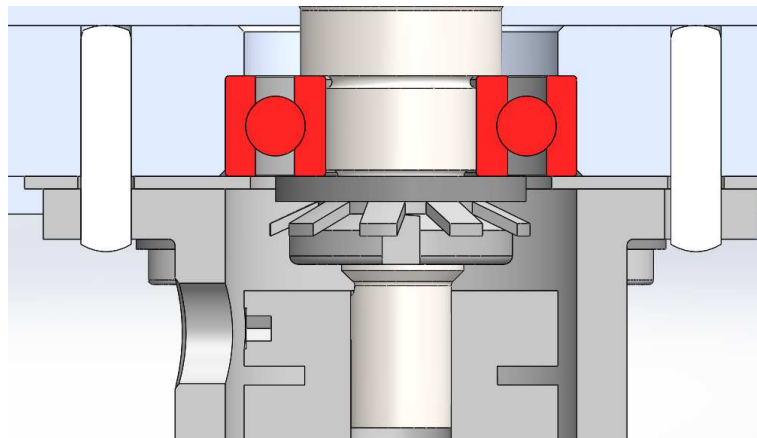


Fig. 54 Secció alçat rodament inferior 23. (Font pròpia)

En la Fig. 54 es veu el rodament fix de la disposició. Com es tracta del rodament fix, les pistes hauran de quedar completament bloquejades en referència a la base inferior (20) i a l'eix (9). Per aconseguir fixar la pista exterior de l'eix a la base es proposa aprofitar el suport auxiliar (1) que va collat a aquesta.

La solució consisteix en mecanitzar la profunditat del seient del rodament, de manera que sobresurti de la superfície inferior de la base. Aleshores s'ha d'instal·lar una xapa d'acer S235 de 1 mm de gruix entre el suport axial i la base. És important que el gruix de la xapa sigui reduït ja que es busca que la xapa deformi elàsticament, permetent el contacte de ambdues superfícies, tant amb la pista exterior del rodament com amb la base.

Per a fixar la pista interior del rodament, l'eix contarà amb un ressalt de diàmetre igual o superior a la que recomana el fabricant (SKF, 2019) i per l'altre costat l'eix està roscat i acanalat per a poder-hi col·locar una femella KM0 i una volandera MB0 (SKF, 2019). Com el diàmetre extern de la volandera no complia amb el diàmetre mínim del ressalt que requereix el rodament, s'ha hagut d'afegir una volandera M10 segons DIN 125 per garantir la superfície de contacte.

Les càrregues i factors de seguretat d'aquests rodaments s'han comprovat a l'apartat de l'annex "Viabilitat rodaments articulació fixe"

Rodaments Eix/roda

Aquesta parella de rodaments(14 inferior i 13 superior) permet que la roda de l'articulació fixe (9)

giri al voltant de l'eix d'aquesta articulació independent d'ell. La disposició d'aquesta parella de rodaments es la mateixa que en l'apartat anterior, es a dir disposició fixe/livre.

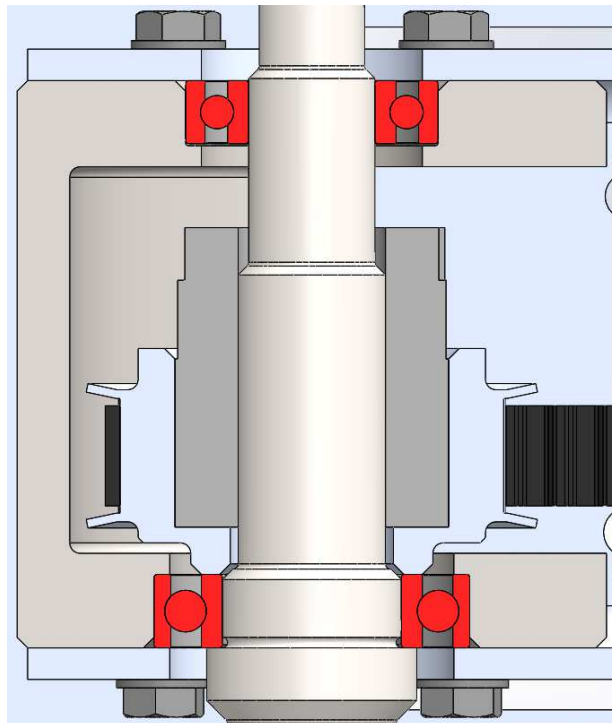


Fig. 55 Secció alçat rodaments eix/roda. (Font pròpia)

En aquesta parella de rodaments s'ha decidit fixar l'inferior. Aquest rodament serà el que suporti les càrregues axials. S'ha escollit d'aquesta manera perquè degut a la disposició de la resta de components aquest ha de ser més gran.

El rodament superior està situat dins el seient mecanitzat de la roda i per la part superior està tapat per el braç complex proximal (26). Aquest seient es lleugerament més ample que el rodament, de manera que existeix un cert joc dins el seient exterior. Per la part de dins, l'eix és llis i aixamfranat en la part del canvi de diàmetre superior per facilitar el muntatge del rodament.

El rodament inferior és fix i per la pista exterior està bloquejat de la mateixa manera que el superior, però en aquest cas l'amplada del seient serà lleugerament inferior a la del rodament de manera que aquest sobresurti de la superfície inferior i quedi completament fixat per el braç (26) fet de xapa de 3 mm d'alumini 1060 que deformarà elàsticament garantint el contacte amb les dues superfícies, quan aquest es colli a la roda.

Per la pista interior es mecanitzarà un ressalt a l'eix. Per la part superior s'aprofitarà la capacitat de l'acoblament politja (15) per a suportar càrregues axials de fins a 6.6 KN (Norelem, s.d.). Així doncs es mecanitzarà la politja adequadament per a suportar i bloquejar axialment el rodament.

D'aquesta manera el rodament i en conseqüència la roda queden posicionats axialment a l'eix i també ho queda la politja.

Les càrregues i factors de seguretat d'aquests rodaments s'han comprovat a l'apartat de l'annex "Viabilitat rodaments articulació fixe"

Roda articulació fixe

Aquesta peça es l'encarregada de contenir el rodaments en el seu interior i per tant haurà de ser mecanitzada amb toleràncies tant dimensionals com geomètriques per garantir una correcta capitalitat entre els dos seients.

Aquest component és l'encarregat de transmetre el parell cap al braç proximal complex (26) que rep dels passadors i conté la parella de rodament que permet la rotació del braç, d'aquesta manera s'aconsegueix que únicament una peça s'hagi de mecanitzar amb toleràncies precises permeten que les altres peces siguin més simples en termes de fabricació.

Per obtenir la peça es torneja i fresa posteriorment a partir d'una barra d'acer E295. Cal buidar la peça, ja que aquesta ha de contenir l'eix i en conseqüència també la politja, per tant ha de permetre el pas de la corretja tot i evitant el contacte amb ella.

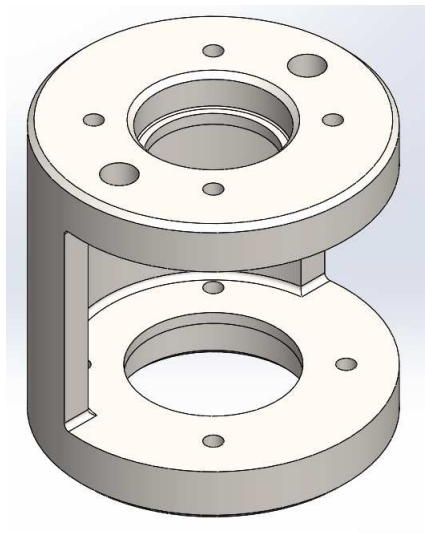


Fig. 56 Vista isomètrica de la roda de l'articulació fixe. (Font pròpia)

7.8 Braç proximal complex

El subgrup que es comenta en aquest apartat és el braç proximal complex que esta format per totes les peces que connecten l'articulació fixe amb l'articulació del colze.

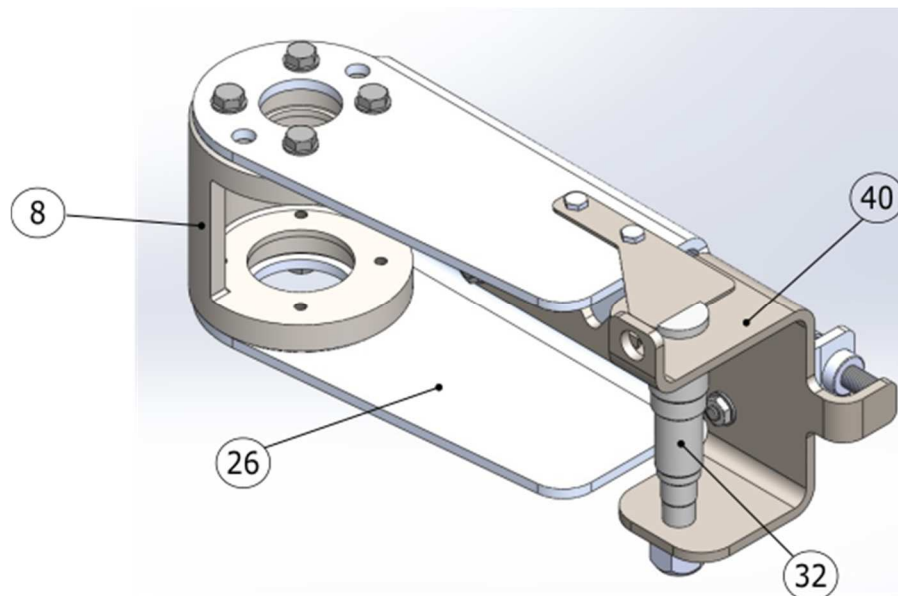


Fig. 57 Braç proximal complex (Font pròpia)

Els components principals d'aquest subgrup son la roda de l'articulació fixe (8), el braç complex proximal (26), el tensor colze (40) i l'eix colze complex (32).

El braç complex proximal, fabricat a partir del tall làser i plegat de xapa d'alumini 1060 envolta per l'exterior la roda de l'articulació fixe. El plegat de la xapa d'alumini s'ha de realitzar de tal manera que l'espai de la part interior del braç sigui lleugerament superior a l'alçada de la roda, de manera que es pugui encaixar la roda a l'interior del perfil d'alumini per collar-lo posteriorment. Collant aquestes dues peces es bloqueja el moviment axial de les pistes exteriors dels rodaments de l'interior de la roda i es permet la transferència de parell.

En primera instància, es va considerar utilitzar passadors per entre les dues peces o aprofitar els mateixos passadors que transmeten el parell per a posicionar el braç proximal complex respecte a la roda. Finalment es va descartar, ja que la longitud del braç proximal, com es comenta a continuació, està subjecte al procés de tensat de la corretja. Es per això que invertir recursos en realitzar un posicionament precís entre aquestes dues peces no produiria cap benefici rellevant en termes de precisió del sistema.

A l'altre extrem del braç, el braç complex proximal (26) transmet el moviment al tensor colze (40) a través de quatre cargols de cap hexagonal M4 amb quatre femelles, situats a la part vertical

dels perfils.

La peça tensor colze (8) es fabricada a partir de xapa de 3 mm d'acer E295. Aquesta peça s'obté per tall làser plegat i finalment mecanitzat únicament dels forats que contendran l'eix del colze (32).

A la Fig. 58 es pot veure com la unió entre el braç proximal complex i el tensor és a la part vertical i els forats passants de la xapa d'alumini són colissos. Aquests colissos permetran ajustar la distància entre eixos com es recomanat (Optibelt, s.d.) i per tant es podrà satisfer el tensat de la corretja.

Per a facilitar aquest procés de tensat, a la part final de les dues peces s'ha realitzat un plec en el que s'ha instal·lat en la peça d'alumini una femella de fixació per xapes (59) la qual suporta una força superior a la de tensat de la corretja (TR Fastenings, s.d.). Quan es colla el cargol M6, aquest fa contacte amb la pestanya del tensor i tensa la corretja. Un cop la corretja està tensa amb els valors adequats cal cargolar els quatre cargols M4 dels colissos.

S'ha buscat allunyar els colissos entre ells el màxim possible per aquests tinguin el mínim impacte en el desalineament entre la direcció longitudinal del braç d'alumini i el tensor d'acer. Amb la mateixa intenció els dos colissos superiors tenen un ampla de 4.5 mm mentre els dos inferiors de 4.8 mm tenen més folgança per evitar problemes de muntatge.

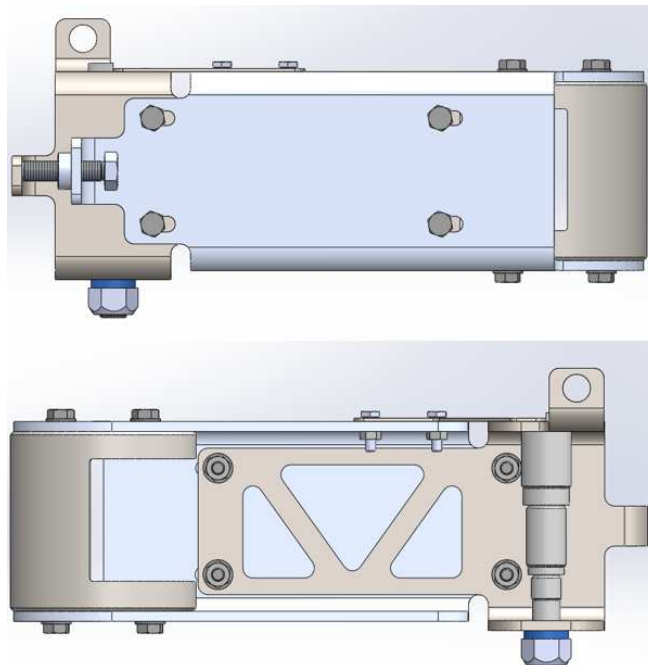


Fig. 58 Vista posterior (superior) i anterior (inferior). (Font pròpia)

Com s'ha comentat anteriorment, és el tensor (40) el que suporta l'eix del colze (32) amb dos forats mecanitzats en el seu extrem. L'ajust entre el tensor i l'eix del colze ha de ser lleuger degut a que es tracta d'una peça de xapa d'acer que cal evitar deformar-la durant el muntatge. És per això que, com es veu a la Fig. 57, s'ha instal·lat a la part superior del braç una xapa d'acer collada per mitjà de dos cargols hexagonals M3. Aquesta xapa evitarà la rotació de l'eix respecte el tensor d'aquest braç. Els forats d'aquests cargols en el braç d'alumini seran colissos per a poder ajustar correctament la xapa contra el pla de l'eix de la part que sobresurt del tensor.

7.9 Articulació del colze complex

Aquesta articulació està formada per el tensor colze (40), l'eix colze complex (32), la roda colze (28), braç complex distal (27), la politja colze (31), la parella de rodaments de la politja (13 i 13), i la parella de rodaments de la roda (29 inferior i 30 superior).

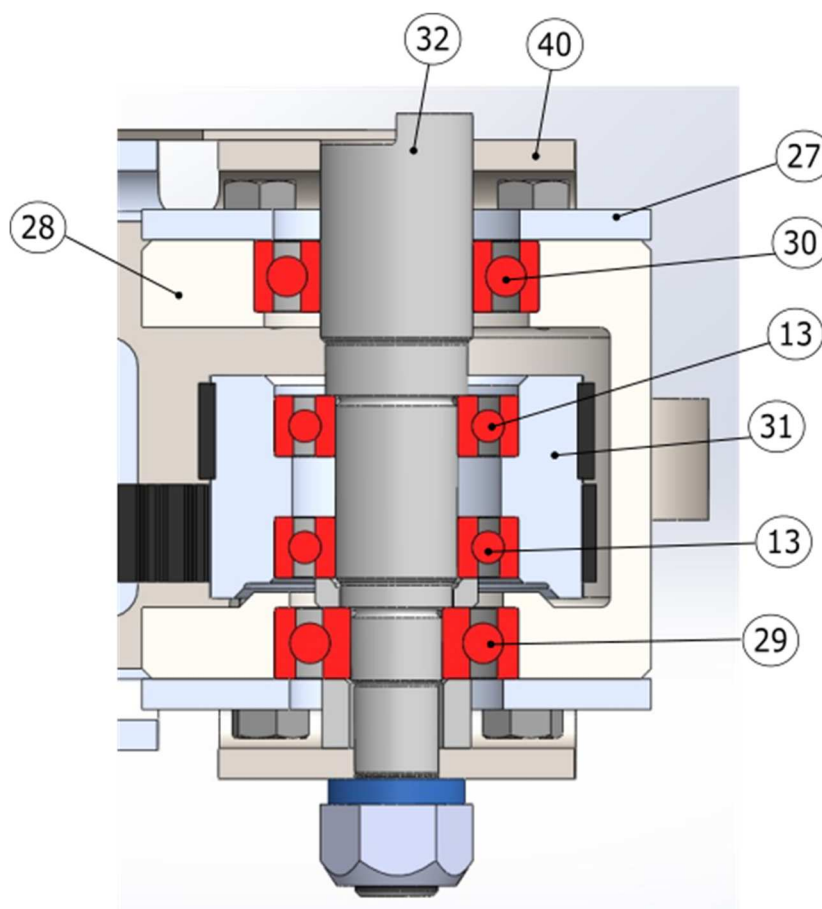


Fig. 59 Secció alçat articulació del colze. (Font pròpia)

Funcionament general de l'articulació

Aquesta articulació ha de poder transmetre les forces del sistema diamant cap a l'articulació de la mà i la politja del seu interior ha de transmetre el parell de la politja anterior a la politja situada a l'articulació final que orientarà el connector en la direcció desitjada. Per a fer aquesta funció, s'ha decidit fixar l'eix al tensor (40) perquè recolzar l'eix sobre l'acer S235 ofereix millors propietats resistents que fer-ho sobre xapa alumini. L'eix a travessarà el tensor per dos dels seus punts ja que la xapa d'acer està plegada amb forma de U.

Serà sobre aquest eix que es recolzarà la roda del colze (28) que és solidària al braç distal complex (27). A l'interior de la roda, de manera similar com s'ha fet a l'articulació simple, està col·locada la politja que gira lliurement respecte l'eix, gràcies a la parella de rodaments del seu interior.

A la part superior de l'eix del colze (32) s'ha mecanitzat una superfície plana que permet la fixació del gir d'aquesta peça respecte el braç proximal.

Parella de rodaments roda/eix

Aquesta parella de rodaments (29 i 30) estan dissenyats en disposició fix/lliure. El rodament superior (30), que és el costat lliure, està situat en el seient mecanitzat a la roda. Aquest seient està mecanitzat de tal manera que la seva amplada és lleugerament superior a l'amplada del rodament i el rodament té un cert joc respecte a la tapa superior, que és el braç distal complex (32). El canvi de diametre immediatament anterior que ha d'atravessar l'eix, s'ha mecanitzat axamfranat per a facilitar el muntatge.

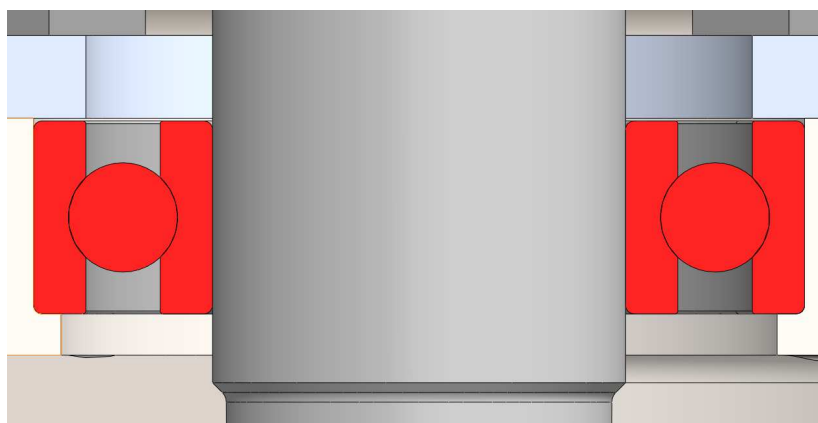


Fig. 60 Detall joc rodament superior (30). (font pròpia)

Les pistes interior i exterior del rodament inferior (30) són fixes a l'eix i la roda respectivament.

Per fixar la pista exterior del rodament, el seient mecanitzat en la roda tindrà una alçada inferior a l'amplada del rodament de manera que una petita part de la pista estigui per fora de la peça. Al collar el braç distal complex fabricat a partir de xapa d'alumini de 3 mm aquest fixa completament la pista contra la part interior del seient de la roda. Per a fixar la pista interior, per la part de sobre del rodament, l'eix està tornejat amb un ressalt. Per sota del rodament es munta un distanciador entre el rodament i el tensor del colze. Per la part de sota del tensor es colla, a la part final de l'eix que es roscada, una femella autoblocant M8 DIN 985 amb una volandera del tipus Nordlock (Nord-Lock Group, 2021) que evitaran l'afluixament del bloqueig del rodament. Al collar la femella, el ressalt de l'eix ajusta la pista interior contra el distanciador bloquejant la seva posició axial.

Inicialment es va considerar soldar el distanciador a la xapa d'acer per a facilitar el muntatge de l'articulació, però finalment es va descartar, per evitar possibles deformacions en la xapa d'acer que poguessin aparèixer durant el procés de soldadura i per reduir el cost de fabricació de la peça.

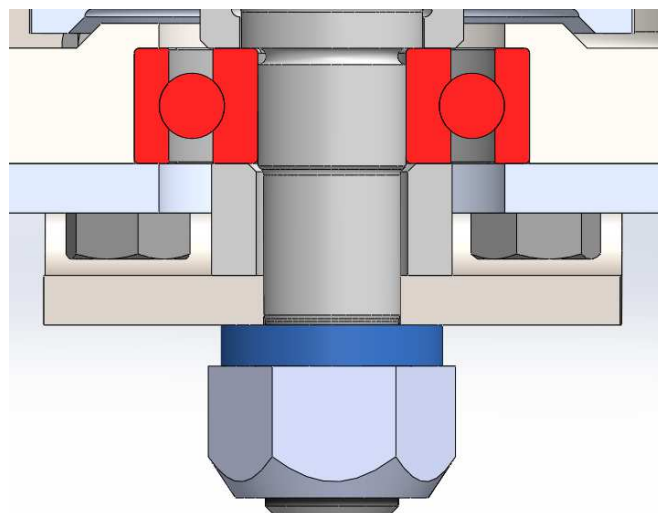


Fig. 61 Detall fixació axial rodament inferior (29). (Font pròpia)

Aquesta parella de rodaments rep les càrregues degudes a les forces de connexió a través de la roda (28) que està collada al braç distal complex. De manera simplificada s'ha comprovat la càrrega d'aquesta parella de rodaments a l'apartat de l'annex "Viabilitat rodaments colze".

Parella rodament politja eix

Aquesta parella de rodaments (13 i 13 Fig. 59) estan muntats en disposició flotant. S'ha decidit d'aquesta manera ja que el joc axial que indueix a la politja en aquesta disposició no tindrà cap

efecte rellevant en el funcionament del sistema de politges, ja que la corretja es un component flexible que accepta petits desalineaments i descentraments entre les politges dels seus extrems. (Optibelt, s.d.)

Segons el fabricant, la corretja de gruixos menors de 25 mm accepten que entre corretja i politja existeixi un angle dins el rang $\pm 1^\circ$. Considerant que la distància entre centres és de 133 mm, això implica permetre un moviment axial de la politja de ± 2.3 mm. Per tant la disposició flotant en aquesta parella de rodaments és acceptable.

Els seients dels rodaments es mecanitzen dins la politja. El rodament superior restringirà el moviment de la politja cap a dalt gràcies a un ressalt en l'eix, mentre el rodament inferior restringirà el moviment cap avall gràcies a un distanciador que fa contacte amb la pista interior del rodament inferior de la roda (29). Cal destacar que el rodament inferior de la roda està fixat axialment per el ressalt en l'eix i no per el distanciador que hi ha sobre seu. En aquesta parella de rodaments, les úniques carregues que han de suportar són les del propi pes de la politja, part del pes de les corretges i les forces degudes al possible desalineament de les politges que idealment no existeix.

Com s'ha demostrat a l'apartat de l'annex "Viabilitat rodaments colze", els rodaments són capaços de suportar les càrregues creades per les corretges i les càrregues axials que poguessin aparèixer no tindrien cap efecte considerable sobre ells.

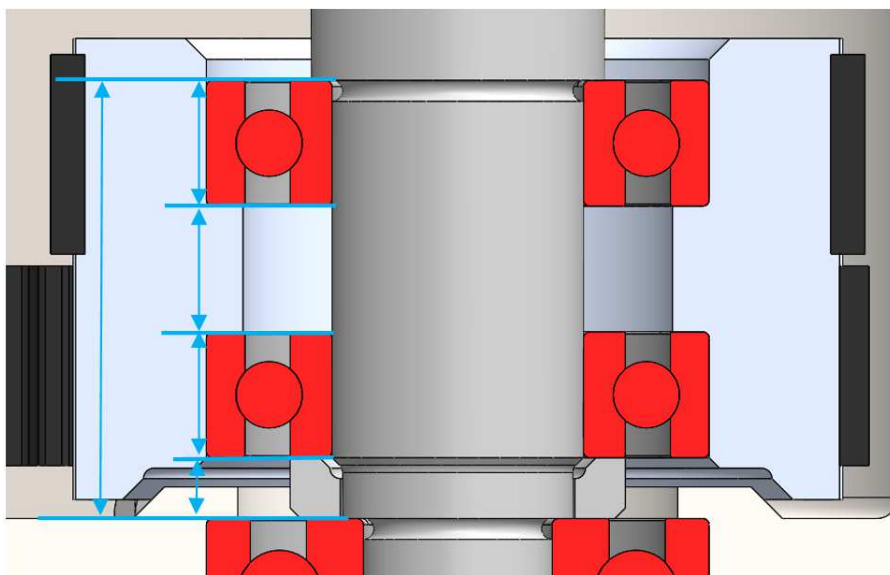


Fig. 62 Detall parella rodaments i cadena de cotes. (Font pròpia)

A la Fig. 62 es pot apreciar la cadena de cotes que s'ha de considerar. Per al correcte funcionament del sistema la cota exterior de l'esquerra ha de ser lleugerament superior a la suma de les cotes interiors de distanciador, rodaments i politja. En aquest cas no és necessari utilització

de toleràncies precises, ja que com s'ha comentat anteriorment el joc axial de la politja no perjudica al correcte funcionament del sistema a no ser que sobrepassi el valor esmentat.

Roda articulació colze

De la mateixa manera que en l'articulació fixe, s'ha dissenyat una única peça que conté els rodaments. Aquesta peça s'ha de mecanitzar amb toleràncies precises per el correcte funcionament de l'articulació.

També s'ha de considerar que aquesta peça en el seu interior conté la politja del colze. Aquesta politja està connectada a les dues corretges, la del braç proximal i la del braç distal. Com aquestes corretges sempre segueixen la direcció dels seus respectius braços, tenint en compte tots els possibles valors de β , que es l'angle entre el braç proximal i distal, i el diàmetre exterior que ocupa la corretja, es podrà decidir la quantitat a material a retirar d'aquesta peça per que en cap posició del sistema hi hagi contacte entre la roda i alguna de les dues corretges.

De l'apartat "7.1 Dimensionament general" coneixem que els valors màxim i mínim per l'angle β son 114.3° i 27° respectivament. Per tant, deixant una certa folgança per cada costat, l'angle a retirar en el mecanitzat del lateral de la peça es de 280° i el restant 80° .

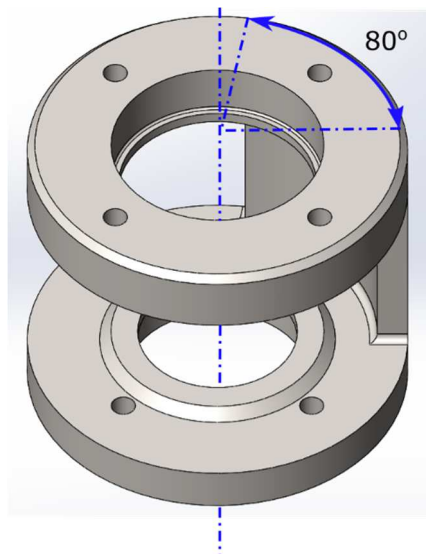


Fig. 63 Vista isomètrica i paret restant de la roda del colze (Font pròpia)

7.10 Braç distal complex

Aquest subgrup té com a funció transmetre les forces rebudes del braç proximal complex a l'articulació de la mà pel posicionament o la connexió del sistema. També ha de contenir en el seu interior la corretja distal i considerar la solució per a poder fer el tensat previ d'aquesta.

Els components principals involucrats en aquest subgrup són: el tensor colze (40), la roda articulació colze (28), el braç complex distal (27), el tensor mà (39) i finalment l'eix mà (47).

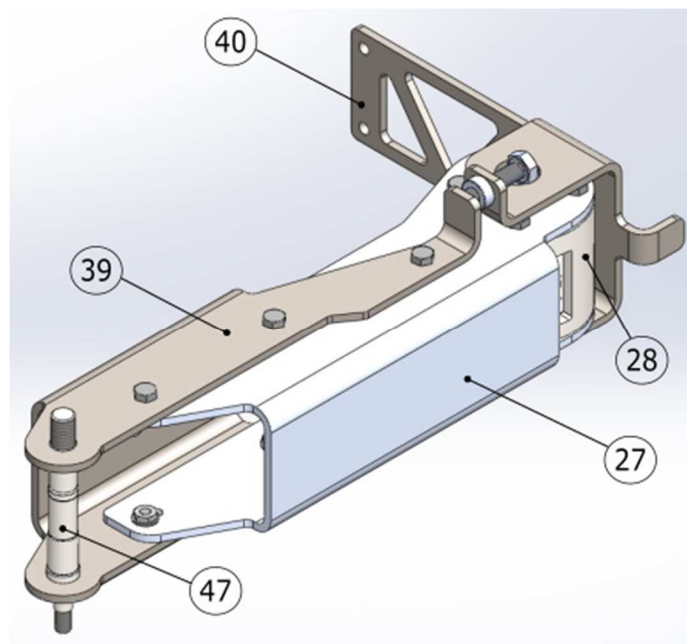


Fig. 64 Vista isomètrica del braç distal complex . (Font pròpia)

De la mateixa manera que en el subgrup del braç proximal, el braç complex distal (27), fabricat a partir del tall làser i plegat de xapa d'alumini de 3 mm, abraça la roda del colze (28) per l'exterior. El plec de la xapa d'alumini s'haurà de fer de manera que l'espai interior del perfil sigui lleugerament més ample que l'alçada de la roda. Quan es collin aquestes dues peces per mitjà de vuit cargols hexagonals, quatre a dalt i quatre a baix, el perfil d'alumini es deformarà elàsticament exercint de tapa per als rodaments i permeten la transmissió de forces de la roda al braç distal. No s'ha considerat cap solució per posicionar relativament les dues peces per al mateix motiu que s'ha argumentat a l'apartat del braç proximal complex.

El braç complex distal (27) està collat per mitjà de sis cargols hexagonals M4 (tres superiors i tres inferiors) i les seves femelles al tensor mà (39). Aquesta peça estarà fabricada a partir de xapa d'acer S235 de 3 mm de gruix, amb tall làser, plegat i mecanitzat..

Caldrà tenir en compte, que la cota exterior del braç d'alumini ha de ser lleugerament inferior a la cota interior del perfil del tensor. Quan es collin les dues peces deformaran elàsticament garantint el seu contacte.

Per a poder realitzar l'operació de tensat de la corretja distal (84) els forats passants seran colissos. Aquests colissos en el braç distal d'alumini seran de 4.8 mm excepte dos d'ells. Els colissos de la part superior més propers a l'articulació de la mà i del colze seran de 4.5 mm per a minimitzar el desalineament.

En el plec vertical de la part superior del tensor colze (40) s'hi instal·la una femella de fixació per xapes (59) (TR Fastenings, s.d.). Quan es colli el cargol instal·lat en aquesta femella farà contacte amb el plec vertical del tensor mà facilitant el procés de tensat de la corretja distal.

Per a realitzar el procés de tensat, el sistema s'ha de posicionar de forma que el braç distal i el braç proximal siguin perpendiculars, i un cop s'hagi completat el tensat i s'hagin collat els sis cargols dels colissos, s'ha de retirar el cargol de tensat.

Tensor mà

Per a dissenyar aquesta peça s'han de tenir en compte algunes consideracions que val la pena comentar amb més detall. La funció d'aquesta peça es suportar l'eix de l'articulació de la mà (47) i transmetre-li les forces que rep del braç complex distal. A més també ha de permetre un fàcil tensat de la corretja distal.

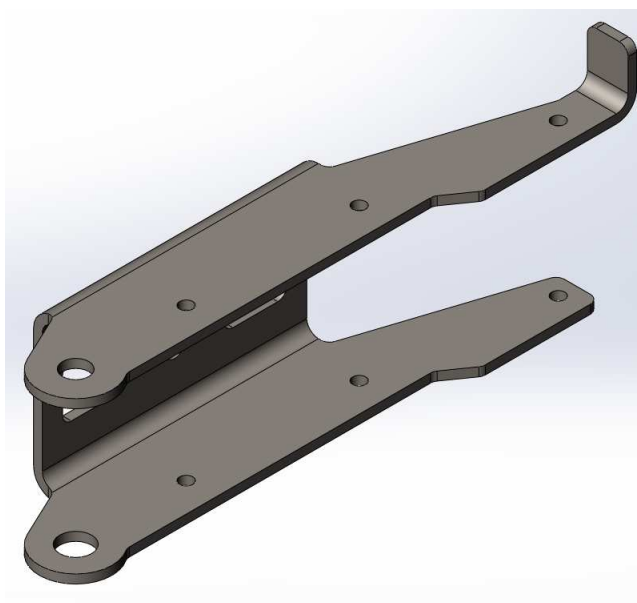


Fig. 65 Vista isomètrica tensor mà. (Font pròpia)

En primera instància, un dels motius pel qual s'ha proposat aquesta forma per la peça ha estat per evitar el contacte entre les parts, quan l'angle β pren el seu valor mínim de 27° . A la Fig. 66 es pot veure com gràcies a la forma d'aquesta peça s'evita el contacte amb altres peces quan el angle β és proper al seu valor mínim.

Aquest problema es podria haver solucionat escurçant la longitud de la peça, però s'ha volgut allargar al màxim perquè els forats passants estiguessin el més separats possible, minimitzant així el desalineament causat pels colissos.

Coneixent la geometria de la peça, és fàcil quantificar quant s'aconsegueix reduir l'error per el fet de situar el tercer cargol. Es coneix que la distància entre el primer i el segon cargol es de 59.5 mm i la distància entre el primer i el tercer es de 119 mm. Per tant suposant que la mida dels tres forats es la mateixa i que el descentrament es màxim per els tres forats.

$$l_1 \cdot \sin(\delta_1) = df, \quad l_2 \cdot \sin(\delta_2) = df \quad (41)$$

Essent l_1 i l_2 les distàncies entre el primer forat i el segon i el primer i el tercer respectivament. Es coneix que per angles petits el sinus de un angle es proper a l'angle, per tant igualant els descentraments dels forats df per els dos casos, s'obté:

$$l_1 \cdot \delta_1 = l_2 \cdot \delta_2 \rightarrow \frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{119}{59.9} = 2 \quad (42)$$

Per tant es pot veure que, sigui quin sigui el δ_{\max} el podem reduir a la mitat per el fet de col·locar el tercer cargol. En aquest cas, suposant que els diàmetres dels forats tinguin els valors centrals de les seves cotes de 4.5 mm, s'està reduint l'angle de desalineament de $\pm 0.48^\circ$ a $\pm 0.24^\circ$.

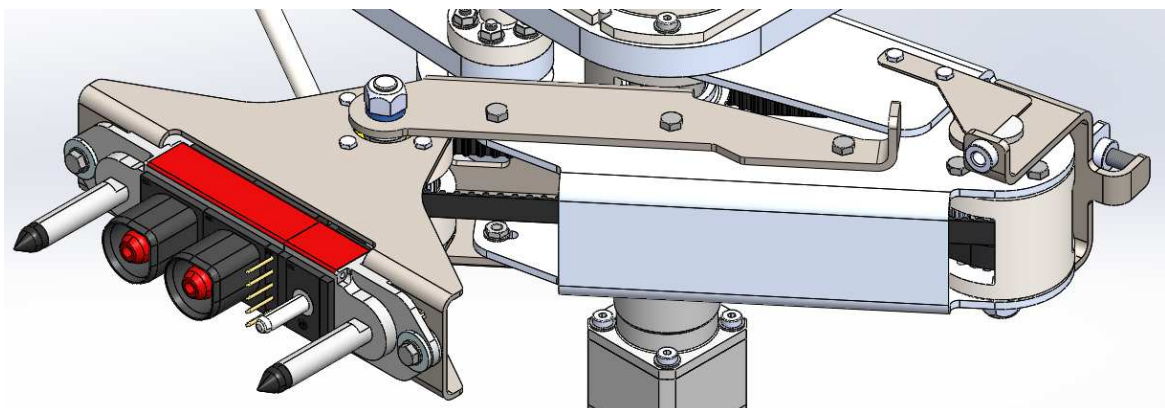


Fig. 66 Vista Isomètrica Sistema β_{\min} . (Font pròpia)

Com s'ha comentat anteriorment, el tensor mà abraça per la part exterior el braç complex distal d'alumini i al collar-los, les peces deformaran elàsticament permetent la unió entre elles. Cal tenir en compte que el tensor de la mà, en el seu extrem, té la funció de suportar l'eix de la mà. Els forats dels extrems que travessaran l'eix mà són mecanitzats a la xapa d'acer un cop plegada. Per evitar que el tensor produeixi forces innecessàries sobre l'eix i per que el muntatge es pugui fer sense inconvenients, caldria preveure que la peça del tensor s'ha de deformar el mínim possible per la part més propera a l'articulació de la mà.

Els cargols que uneixen les dues peces estan disposats de forma que, els quatre més propers a l'articulació de la mà, estan situats desplaçats cap al tram vertical de la peça de xapa d'acer i són més propers a l'extrem de la peça de xapa d'alumini. El que s'obté amb el desplaçament comentat d'aquestes unions, és que el collat dels cargols es realitzi en una zona on la peça tensor mà és més rígida i el braç d'alumini ho és menys, per tant gran part de la deformació serà per part de la peça de xapa d'alumini.

A l'altre extrem de les peces, a la zona més propera a l'articulació del colze, el braç distal d'alumini serà més rígid per el fet d'estar collat abraçant la roda de l'articulació del colze. Es per això que interessa que la peça del tensor, en aquesta part més propera al colze, sigui més flexible i s'adapti a la forma del perfil d'alumini. D'aquesta manera es reduiran les tensions i les forces separadores en el collat de l'articulació del colze.

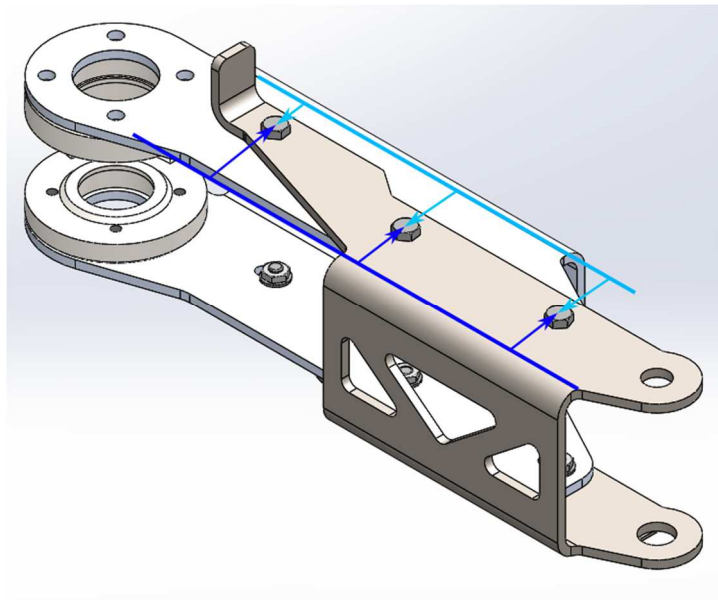


Fig. 67 Disposició dels cargols del braç distal complex. (Font pròpia)

7.11 Braç simple

Per aquest braç del sistema s'ha buscat la un disseny el més simple possible que sigui compatible amb les parts dissenyades a l'altre braç.

Aquest subgrup estarà format per les peces principals: base superior (21), base inferior (20) , la parella de rodaments (30 superior i 22 inferior) , eix fixe simple (51), braç proximal simple (52), ròtula de rodaments (49), eix colze simple (53) i braç distal simple (50).

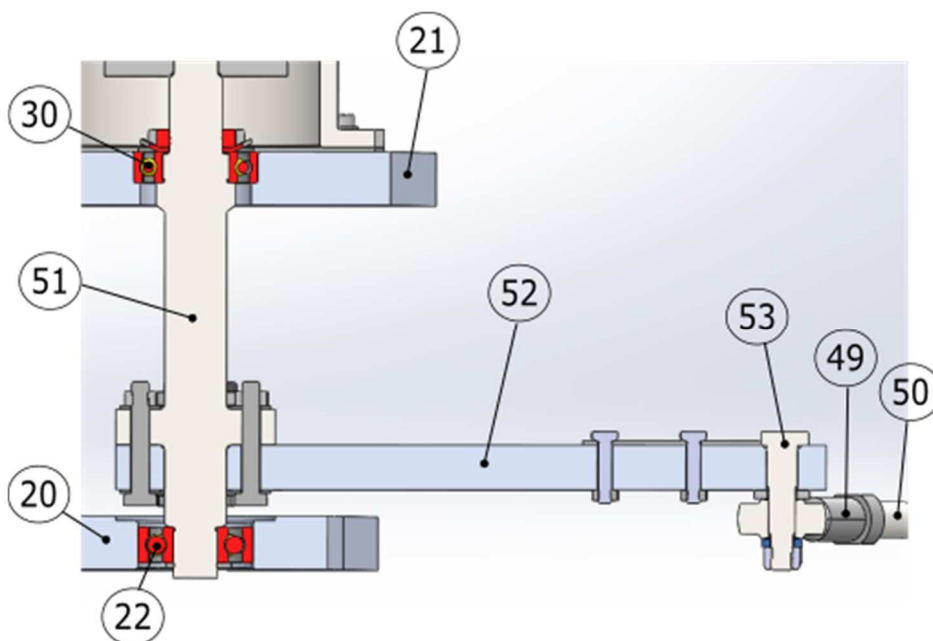


Fig. 68 Secció vista lateral esquerra del braç simple. (Font pròpia)

Articulació fixe simple

Per a resoldre aquesta articulació, que ha de ser actuada a la part superior, es mecanitzen dos forats a la base superior i inferior. L'eix es recolze sobre els rodaments situats a l'interior dels seients mecanitzats a les bases. La disposició dels rodaments serà lliure/fixe de manera que es fixa el rodament més proper a la sortida del actuador, és a dir el superior.

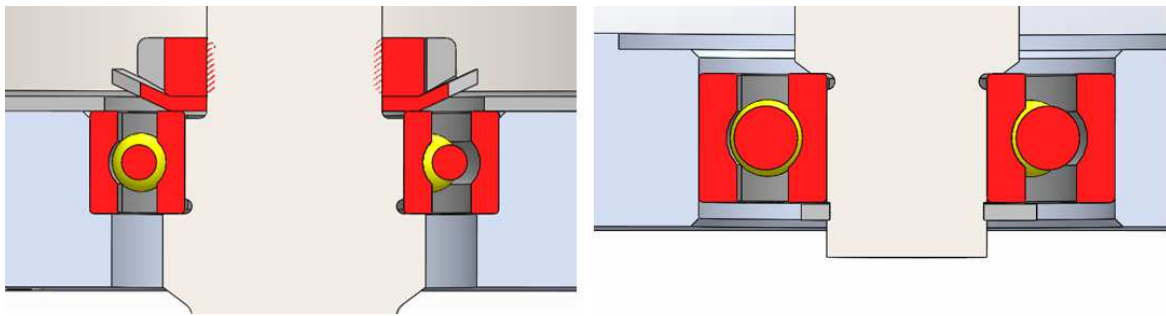


Fig. 69 Detalls superior (esquerra) i inferior (dreta) dels rodaments. (Font pròpia)

Per a fixar axialment la pista interior del rodament superior es mecanitza un ressalt a l'eix de la mida adequada per aquest rodament (30) i per a d'alt l'eix és roscat i acanalat per a poder-hi collar una femella KM i volandera MB de mètrica M12. A la esquerra de la Fig. 69 es pot veure com el seient del rodament és menys ample que l'alçada del rodament de manera que la volandera fa contacte sobre la pista interior del rodament bloquejant-la contra el ressalt.

Per a la fixació de la pista exterior es proposa la mateixa solució que a l'articulació fixe complexa. Entre la base superior (21) i el suport auxiliar de l'actuador (5) es situa una xapa d'acer de 1 mm d'espessor. El seient mecanitzat a la base superior és de tal manera que el rodament sobresurt lleugerament per la part de dalt. Al collar el suport auxiliar del actuador, la xapa d'acer aixafa la pista exterior del rodament cap a l'interior del seient.

Pel que fa el costat lliure de la parella de rodaments a la dreta de la Fig. 69, s'ha considerat un ressalt a l'eix per la part superior i un anell elàstic segons DIN 471 per la part inferior.

Per a transmetre el parell de l'eix (51) al braç proximal simple (52) de manera senzilla es proposen sis cargols de cap hexagonal M4 disposats al volant de l'eix com es veu a la part inferior esquerra de la Fig. 68.

A l'apartat de l'annex "Eix braç simple" s'ha demostrat numèricament la validesa de les dimensions de l'eix d'aquesta articulació per a poder transmetre el parell. Considerant un funcionament anòmal del sistema s'ha suposat que es transmet el parell de torsió màxim que l'acoblament flexible es capaç de generar suportar de 17 Nm (HUCO, s.d.). Tot i realitzar els càlculs en aquesta situació tan conservadora s'ha obtingut que el factor de seguretat de l'eix degut a les torsions es de 2.3.

Articulació colze simple

El braç proximal simple (51) ha de transmetre, en el seu extrem, les forces sobre el braç distal simple (50).

A l'extrem del braç proximal s'hi mecanitza un forat per el qual passa l'eix del colze simple (53)

que és tornejat i fresat a partir d'una barra d'acer E295. L'ajust d'aquest forat i eix és forçat mitja, ja que no interessa cap tipus de joc en la unió. Un ressalt a la part superior de l'eix el posiciona axialment.

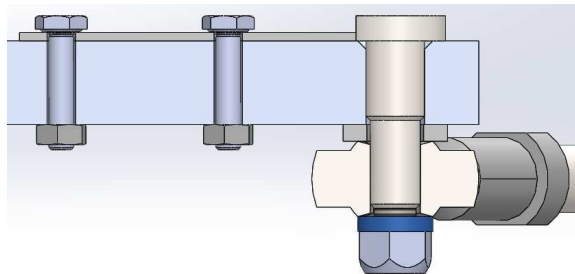


Fig. 70 Detall colze simple. (Font pròpia)

Per evitar el gir de l'eix respecte el braç proximal es mecanitza un pla a l'eix i al braç s'hi colla una xapa d'acer d'1 mm per a que faci contacte amb la superfície. Els cargols per a collar aquesta xapa són de cap hexagonal M3.

Per la part inferior del braç, l'eix sobresurt en voladís. En aquesta part de l'eix s'hi introdueix una ròtula de rodaments (Norelem, s.d.) i es colla per la part inferior de l'eix que és roscat amb mètrica M6. Per collar es fa amb una femella autoblocant segons DIN 985 i una volandera Nordlock (Nord-Lock Group, 2021).

Per evitar redundàncies en els enllaços del sistema, el braç distal simple ha estat dissenyat amb ròtules de rodaments en els seus extrems. Per tant és el braç complex el que suporta qualsevol tipus de càrrega vertical o moment que actuï sobre el sistema.

Per tant el braç distal simple únicament transmet forces en la seva direcció que és horitzontal.

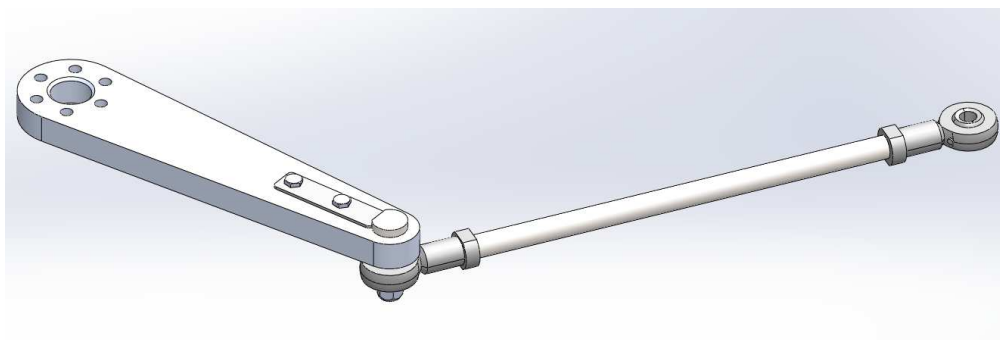


Fig. 71 Vista isomètrica del braç simple. (font pròpia)

Per minimitzar els moments de torsió i flector en la direcció horitzontal, es important que la distància entre el punt mig del contacte entre la ròtula i l'eix i el punt mig del contacte entre l'eix i el braç proximal sigui petita.

Es té en compte el valor màxim de la força en el colze calculat a l'apartat de l'annex "Càlcul de forces estàtiques del sistema" de 76 N i s'aplica un coeficient de majoració de 1.5. El valor de la distància entre els punts mitjos comentats anteriorment son 11.5 mm

Els valors de moment flector horitzontal i de torsió màxims es donarien quan braços fossin paral·lels i perpendiculars respectivament. Cal tenir en compte que això es una simplificació, ja que la força màxima del colze de 76 N es dona en una configuració concreta en la que la posició relativa dels braços no es ni perpendicular ni paral·lela. El valor màxim d'aquests moments hipotètics es igual per els dos i és de 1311 Nmm.

Per altra banda, considerant el parell que ha de transmetre el braç proximal en el pitjor dels casos, que s'ha trobat a l'apartat de l'annex "Càlcul de forces estàtiques del sistema" de valor 8.6 Nm i li apliquem factor de majoració de càrregues de 1.5, s'obté 12900 Nmm.

Per tant és raonable que el braç proximal sigui aplanat i més ample per la part propera a l'articulació fixe, ja que serà en aquella zona on els moment flexors tindran valors més grans.

Les ròtules de rodaments situades als extrems del braç distal simple també han de suportar els 114 N considerant el factor de majoració de càrregues de 1.5. Les capacitats de les càrregues estàtiques i dinàmiques del model escollit (2762-06) son 650 N i 2750 N respectivament (Norelem, s.d.). Per tant podem assegurar que les ròtules poden suportar les càrregues a les que estaran sotmeses.

El braç proximal simple és d'alumini 7075 mecanitzat de la mateixa manera que la base amb un gruix de 10mm. El braç distal simple és una barra d'acer E295 roscada amb mètrica M6 en els seus extrems per a poder-la unir a les ròtules.

7.12 Articulació de la mà

Aquest últim subgrup està vinculat tant al braç complex com al simple i també al sistema de politges. Aquesta ultima articulació ha de poder orientar i transmetre les forces al connector que és el que finalment realitza la connexió.

El components principals que formen part d'aquest subgrup son: eix mà (47), roda inferior mà (42), roda superior mà (44), politja mà (43), tensor mà (39), la parella de rodaments (22 inferior i 70 superior), suport connector (46) i connector mascle (79).

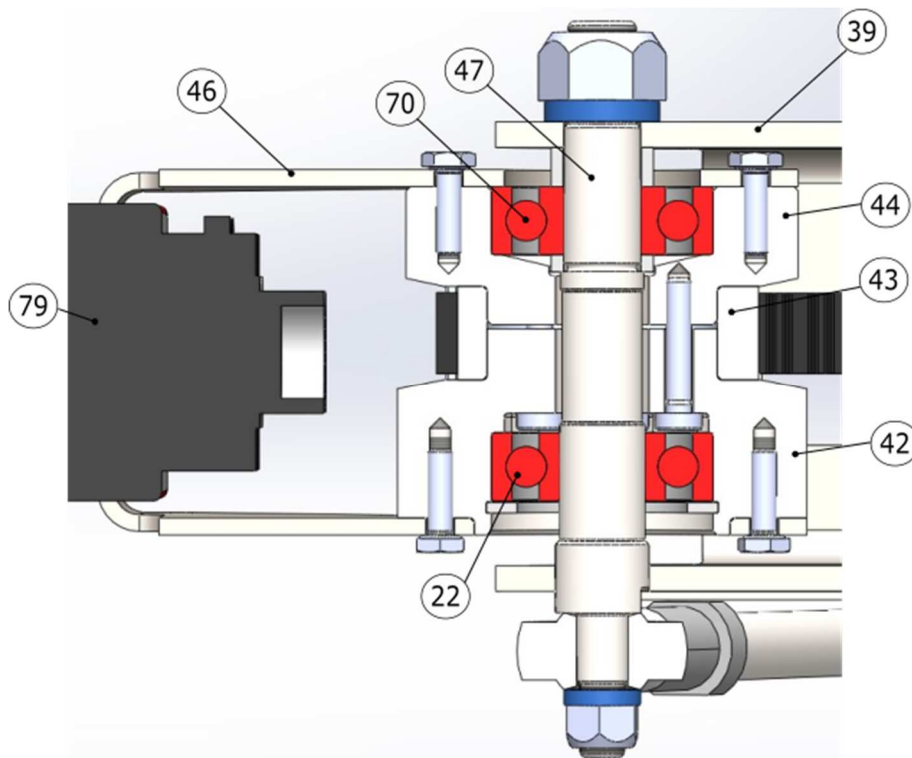


Fig. 72 Vista lateral articulació mà. (Font pròpia)

Bloqueig del gir de l'eix

Tal com s'ha comentat a l'apartat "Tensor mà" l'eix (47) d'aquesta articulació es suportat per el tensor mà (39). L'ajust entre aquestes dues peces és forçat mitjà i per tant requereix d'una peça que bloquegi el gir de l'eix.

Per la part inferior, aprofitant els cargols que collen el tensor mà (39) amb el braç distal complex (27) s'hi colla addicionalment una xapa d'acer de 1 mm de gruix (61) que es recolza sobre un pla fresat de l'eix, de manera que el gir de l'eix respecte al tenor quedarà bloquejat.

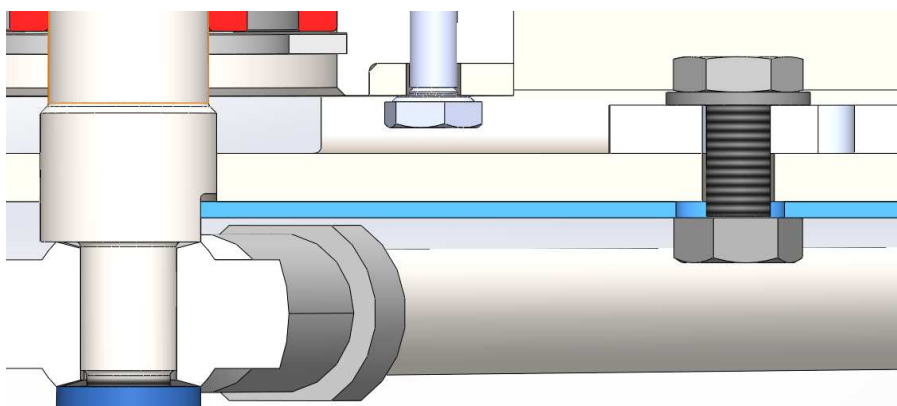


Fig. 73 Detall bloqueig gir. (Font pròpia)

Eix de la mà

Aquest eix (47) té com a funció rebre les forces dels braços simple i complex per a transmetre'ls al conjunt de peces que subjecten el connector mascle (79). Aquesta transmissió de les forces la fa a través del contacte amb la parella de rodaments (22,70).

Com es veu a la Fig. 72 el braç distal simple empeny l'eix per la part inferior que sobresurt del perfil en U del tensor mà (39). Aquesta força únicament pot ser en la direcció del braç distal simple, ja que aquest braç té ròtules roscades en els seus extrems.

El braç complex, per altre banda, no només aplica les forces que s'han obtingut en el càlcul de dues dimensions a l'annex "Càlcul de forces estàtiques del sistema", sinó que també aplica les forces d'enllaç necessàries per a subjectar el conjunt i suportar les càrregues verticals.

Per analitzar les tensions d'aquest eix, s'han considerat les forces en cada una de les posicions dins la zona forces de connexió definida a l'apartat "7.1 Dimensionament general". Considerant les dimensions del sistema i els punts d'aplicació de les forces que actuen sobre ell s'ha realitzat un càlcul de les tensions que apareixen a l'eix en el moment de la connexió.

En aquets càlculs s'ha considerat l'aparició de forces verticals a la punta del connector per un descentrament en la posició vertical del sistema del 20% de les forces horitzontals de connexió. Per tant de 22.5 N.

En tot moment s'ha considerat un factor de majoració de les forces de 1.5.

Automatitzant el càlcul amb una funció de MatLab s'ha demostrat que la tensió màxima a la que estarà sotmès l'eix es de 67.5 MPa, que està per sota del límit elàstic de l'acer E295 de l'eix amb valor 275 MPa.

Per a veure els càlculs detallats cal anar a l'apartat de l'annex "Càlcul de tensions a l'eix de l'articulació de la mà"

També s'ha cregut oportú realitzar un càlcul a fatiga d'aquest eix, ja que es creu que les forces de connexió podrien prendre el sentit contrari en el moment de la desconexió, de manera que l'eix estaria flectant en direccions oposades. Per a fer aquest càlcul s'ha considerat totes les opcions possibles i s'ha buscat el cicle de fatiga més crític considerant connexió i desconexió en el mateix punt. Altre vegada s'ha utilitzat el programa MatLab per automatitzar el procés de càlcul.

Finalment s'ha pogut obtenir que, en la situació i secció més crítica de l'eix, el factor de seguretat a fatiga es de 4.6. Per tant podem concloure que l'eix no fallarà a fatiga i està treballant a vida infinita ja que el pitjor del cicles no causa cap dany sobre l'eix.

Per a veure els càlculs en detall anar a l'apartat "Càlcul a fatiga de l'eix".

Rodaments de l'articulació de la mà

Aquesta parella de rodaments (22,70) estan disposats en configuració fix/lliure, ja es una configuració adequada quan les càrregues axials son baixes i es requereix precisió en el sentit axial de l'eix.

La principal força que actua de forma constant sobre els rodaments i que està present durant el moviment de la poltitja és la força de tensat de la corretja distal.

El rodament inferior (22) és el rodament lliure de la disposició. A la roda inferior mà (42) hi ha mecanitzat el seient d'aquest rodament. Pera bloquejar la pista exterior es situarà un anell elàstic al forat segons DIN 472 de manera que el rodament tindrà un cert joc entre l'anell elàstic i el fons del forat mecanitzat a la roda inferior.

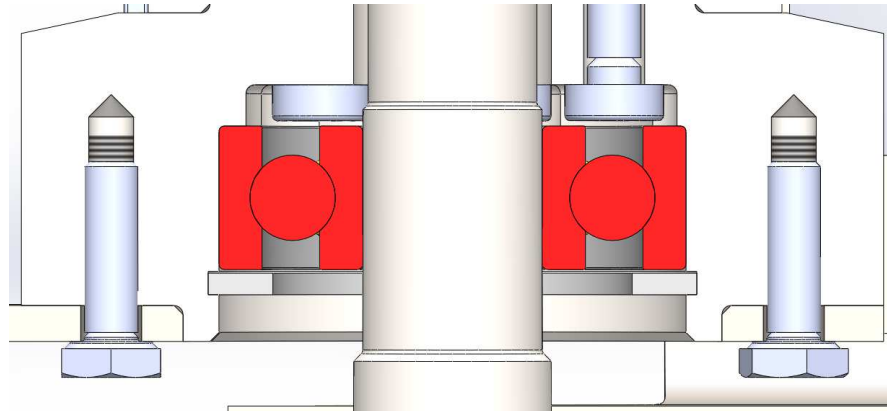


Fig. 74 Detall rodament inferior. (Font pròpia)

El rodament superior (70) es el rodament fix de la disposició.

Per a fixar la pista exterior es mecanitza el seient a la roda superior mà (44), de manera que aquest sigui més baix que l'amplada del seient. El rodament sobresurt del seient i quan es colla la peça suport connector (46) feta de xapa d'acer de 2 mm, es deforma elàsticament prement la pista exterior del rodament contra el ressalt inferior del la roda superior.

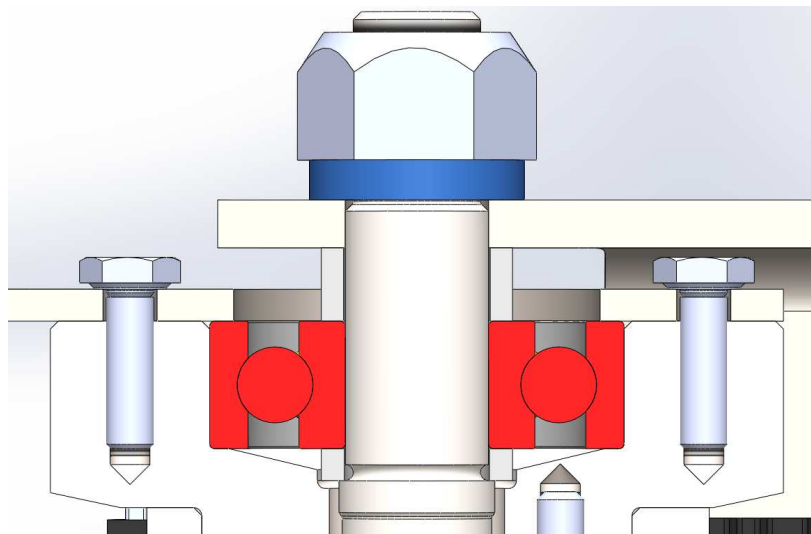


Fig. 75 Detall rodament superior. (Font pròpia)

El procediment per a fixar la pista interior requereix mecanitzar a la roda superior un petit esglaó. Aquest esglaó servirà per recolzar en el seu interior el distanciador mà inferior(69). Per a fer el muntatge del rodament primer s'ha de situar el distanciador en el esglaó, després posicionar el rodament a l'interior del seient de la roda superior i finalment collar el suport connector.

Un cop s'hagi muntat la resta de components s'introdueix l'eix per el forat inferior. Quan el ressalt mecanitzat a l'eix faci contacte amb l'anell, l'aixeca del esglaó i fixa axialment la pista interior del rodament contra el distanciador mà superior (48). Finalment s'ha de collar la femella autoblocant que es veu a la Fig. 75.

Cal considerar que la superfície de contacte que ha d'existir entre el ressalt de l'eix i el distanciador superior ha de ser com a mínim la que hi hauria si s'hagués pogut col·locar un anell elàstic.

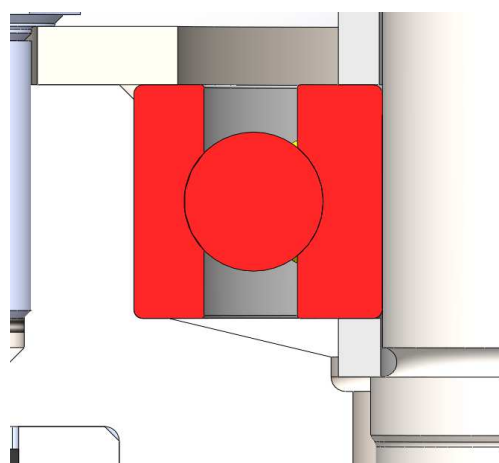


Fig. 76 Detall ajust pista interior. (Font pròpia)

Les càrregues que apareixen sobre aquests rodaments venen donades per les forces de connexió, el tensat de la corretja i el pes dels components que suporten. Cal notar que les forces de connexió s'apliquen puntualment durant la connexió i en estàtic.

Per a fer el càlcul de les càrregues sobre els rodaments es considera el diagrama de cos lliure de totes les peces de la mà, i es calculen les forces d'enllaç puntuals que han de generar els rodaments en els seus punts mitjos per a que el cos lliure sigui estàtic.

Realitzant el càlcul amb MatLab per a totes les configuracions del sistema possibles, les càrregues radial equivalents sobre els rodaments superior i inferior són 190 N i 220 N respectivament.

Vistes les càrregues tant reduïdes dels rodaments s'ha comprovat si es complia, per un cas sense les forces de connexió (moviment lliure de la mà), el criteri de càrregues mínimes que defineix el fabricant (SKF, 2019), i el resultat ha sigut negatiu per al rodament superior. Per a que aquest rodament tingui càrrega mínima s'haurà d'ajustar la tensió de l'eix per a que generi la càrrega necessària sobre el rodament superior en qualsevol situació. Per a que es compleixi aquesta condició la tensió de la corretja ha de ser 117 N.

Càlculs detallats sobre els rodaments d'aquesta articulació en l'apartat de l'annex "Càlculs Rodaments mà"

Conjunt politja i suport

Per a poder transmetre el moviment de la politja de la mà (43) al suport del connector (46) cal unir aquestes dues peces. La solució que es proposa a la Fig. 72 consisteix en dividir la peça que conté els rodaments d'aquesta articulació en dues de diferents (42,44) de manera que, collant-les amb la politja al mig quedin solidàries entre elles i a la politja. La politja, per la fricció amb les dues superfícies de la roda inferior i superior és capaç de transmetre el parell que rep de la corretja a les seves dents.

Com s'ha comentat a l'apartat "7.4 Sistema de politges i corretges" una de les politges de cada corretja ha de tenir pestanyes per a evitar que la corretja escapi axialment. En aquest cas la roda inferior i superior estan mecanitzades per la part propera a la politja de manera que actuen a mode de pestanyes segons indica la ISO 5294.

Un cop es tenen collades les peces roda inferior i roda superior abraçant la politja, únicament cal collar per la part exterior el suport connector. Per a poder collar aquesta peça al voltant del conjunt cal obrir les seves "ales", veure Fig. 78 Vista isomètrica del suport connector. (Font pròpia),

permetent introduir el sortint circular de la roda inferior en el forat inferior mecanitzat a la peça.

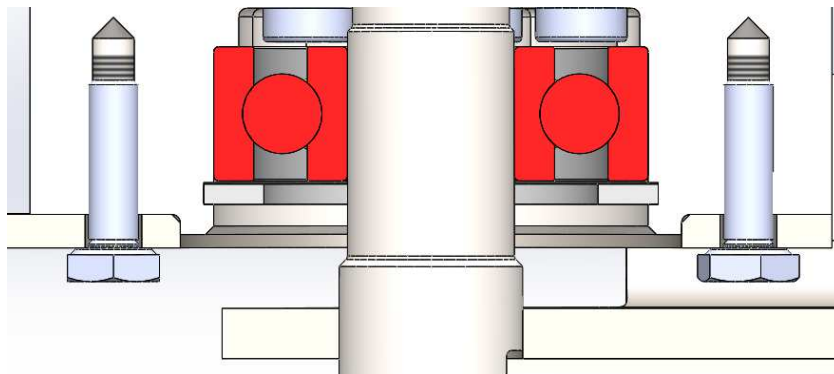


Fig. 77 Detall sortint inferior circular. (Font pròpia)

La peça suport connector (46) es fabricarà a partir de xapa d'acer de 2 mm, inicialment amb tall làser, posterior plegat i finalment mecanitzat.

El mecanitzat de la peça s'aplicarà al forat inferior i als dos forats dels cargols que subjecten el connector mascle (79).

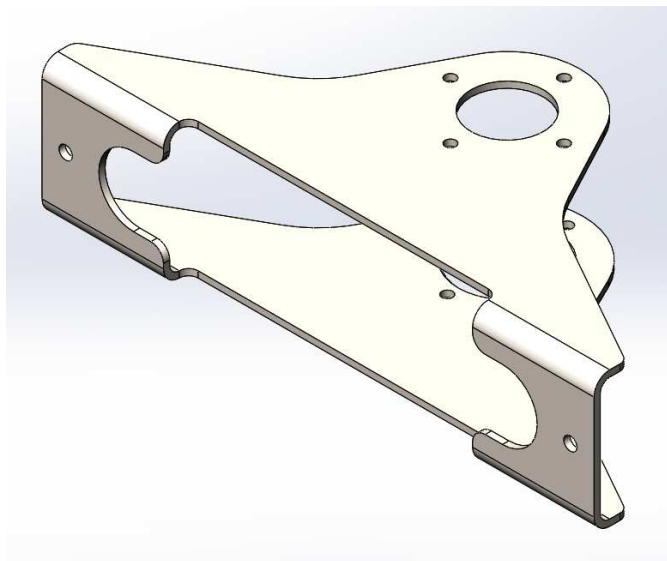


Fig. 78 Vista isomètrica del suport connector. (Font pròpia)

8. Disseny de detall

En aquest apartat del projecte s'emeten els plànols de les peces de l'articulació de la mà discutint i justificant les cotes, toleràncies i acabats superficials més rellevants.

S'ha escollit aquesta articulació, ja que es podria considerar la que s'ha validat i comprovat amb més precisió en l'apartat del disseny de materialització.

A l'annex s'adjunten tots els plànols comentats en aquest apartat.

8.1 Consideracions generals

El conjunt de peces del suport està situat axialment sobre l'eix per la cadena de cotes formada per l'alçada dels distanciadors i l'alçada del rodament superior que es pot veure a la Fig. 79

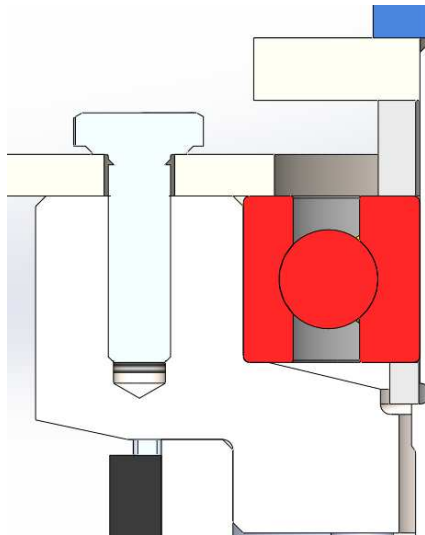


Fig. 79 Posicionament axial del conjunt mà (Font pròpia)

Es coneix, per les dades del fabricant de corretges (Optibelt, s.d.), que l'angle màxim que pot existir entre corretja i politja per un correcte funcionament es de $\pm 1^\circ$. Per tant cal veure en quines toleràncies de posicionament de la politja es tradueix aquest angle. Es coneix la cota entre centres de la politja distal de 209 mm, per tant el descentrament axial serà:

$$2 \cdot 209 \cdot \sin(1) = 7.3 \text{ mm} \quad (43)$$

Per tant amb aquest valor el descentrament d'aquest component no serà important.

Amb aquestes condicions queden definides les cotes i toleràncies del distanciador superior com una secció circular buida amb diàmetre interior 9.4 mm, diàmetre exterior 13 mm i alçada 5 mm. Totes les toleràncies d'aquesta peça són segons ISO 2768-m ja que no es requereix una precisió

adicional.

Clase de Tolerancia	Descripción	Desviaciones admisibles respecto al valor nominal d (en mm.)							
		0,5 <d≤ 3	3 <d≤ 6	6 <d≤ 30	30 <d≤ 120	120 <d≤ 400	400 <d≤ 1000	1000 <d≤ 2000	2000 <d≤ 4000
f	fina	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5	-
m	media	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2
c	grosera	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3	±4
v	muy grosera	-	±0,5	±1	±1,5	±2,5	±4	±6	±8

Taula 5 Toleràncies segons ISO 2768.

8.2 Necessitats rodaments

Es coneix que els rodaments situats en aquesta articulació són els models 629 a la part superior i 6000 a la part inferior.

A l'apartat de l'annex "Càlculs Rodaments ma" s'han definit i comprovat en detall les càrregues sobre aquests rodaments. D'aquest mateix apartat es coneix que quan els rodaments estan en moviment, les úniques càrregues sobre aquests són les provocades per el pes, la inèrcia i la tensió de la corretja distal. D'aquestes tres càrregues es coneix que la més rellevant és la tensió de la corretja que aplica una càrrega aproximada sobre els rodaments de 60 N. Com es coneix del disseny, l'eix és solidari al braç distal i per tant aquestes forces de tensió són fixes en direcció a les pistes interiors dels rodaments i rotatives respecte a la pista exterior.

En aquesta situació de càrregues reduïdes i rotatives respecte la pista exterior, les toleràncies i els acabats superficials que recomana el fabricant per el seient del rodament i l'eix on recolzen són les presentades a la taula.

Model	629	600
Tolerància eix	h6	h6
Acabat superficial eix	Ra1,6	Ra1,6
Tolerància seient	M7	M7
Acabat superficial seient	Ra3.2	Ra3.2

Taula 6 Necessitats rodaments. (Font pròpia)

8.3 Bloqueig axial rodament superior

A la Fig. 79 es pot veure com la pista exterior del rodament 629 es bloqueja axialment per el seient i la peça de xapa d'acer de 2 mm que es el suport connector. Per a que la peça de xapa de 2 mm es deformi elàsticament fent contacte amb el rodament i la superfície on serà collat cal que les toleràncies ho permetin.

Per a que la peça es deformi elàsticament es considerarà que ho pot fer fins al valor de 0.1 mm sense haver de generar tensions crítiques a la xapa ni tampoc al rodament.

Del catàleg del fabricant de rodaments es coneix que el model de rodament 629 té unes toleràncies a la seva pista exterior de ± 0.0075 . Per tant, per a que la xapa premi la pista exterior i ho faci dins els rang desitjat, la cota de l'alçada del seient serà:

$$8_{-0.11}^0 \text{ mm} \quad (44)$$

8.4 Dimensionat del eix de la mà

Distanciador inferior i ressalt de l'eix

Com s'ha comentat anteriorment, per a que el distanciador inferior treballi en condicions correctes haurà de tenir com a mínim, la mateixa superfície de contacte amb el ressalt que té un anell elàstic per a l'eix de les dimensions considerades de 9 mm.

Segons DIN 471 l'anell elàstic adequat per a l'eix de 9 mm està situat en una ranura de 8.6 mm per tant la superfície de contacte està generada per la diferència de 0.4 mm entre els diàmetres.

Una altra condició per imposar es que l'eix ha de poder passar amb joc per dins el distanciador. Per a facilitar el muntatge s'ha considerat que un joc mínim de 0.1 mm es suficient.

Amb les consideracions anteriors, els requisits dels valors de les cotes són els següents i tenint en compte que la tolerància de l'eix es requisit del rodament superior:

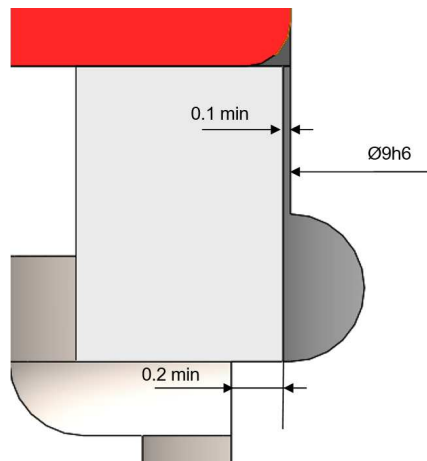


Fig. 80 Condicions distanciador inferior mà (Font pròpia)

S'ha pogut comprovar que amb les toleràncies ISO 2768-m del distanciador i l'eix no es compleixen les condicions. Per a repartir les toleràncies s'ha decidit, si es possible, aplicar les toleràncies especials a el distanciador, degut a la facilitat que suposa el seu mecanitzat.

$$\varnothing 9h6 = 9^0_{-0.008} \rightarrow D_{min} = 9 + 0.1 = 9.1 \text{ mm} \quad (45)$$

Considerant ISO 2768-m en el passador, el valor màxim de la tolerància del diàmetre del distanciador es el següent.

$$\varnothing_{ressalt} = 9.8 \pm 0.2, \quad D_{max} = 9.6 - 0.4 = 9.2 \text{ mm} \quad (46)$$

Per tant el valor de la cota del diàmetre interior del passador haurà de ser:

$$D_{dist} = 9.1^+_{0}{}^{0.1} \quad (47)$$

Punts d'enllaç entre l'eix i el tensor mà

En el punts on l'eix travessa la xapa de 3 mm de la peça tensor mà on va suportat, es requerirà un ajust amb el mínim joc possible per evitar el moviments de l'eix.

Per aquest ajust s'ha decidit utilitzar ajust amb joc que tingui un bon posicionament de l'eix i que faciliti el muntatge de les peces.

L'ajust escollit es H7h6 tant per el forat superior com per l'inferior.

El Joc màxim i mínim, valors en micròmetres, per a l'ajust superior serà:

$$eix\ 9h6 = 9_{-9}^0, \quad forat\ 9H7 = 9_0^{+15} \quad (48)$$

$$J_{min} = 0\ mm, \quad J_{max} = 0.024\ mm$$

I per a l'ajust inferior serà:

$$eix\ 9h6 = 11_{-11}^0, \quad forat\ 9H7 = 9_0^{+18} \quad (49)$$

$$J_{min} = 0\ mm, \quad J_{max} = 0.029\ mm$$

8.5 Ajust i muntatge entre el suport i la roda inferior de la mà

Ajust

En aquest apartat es justifica l'ajust utilitzat entre el ressalt de la roda inferior de la mà i el suport del connector.

Aquest ressalt s'ha dissenyat per evitar el possible descentrament de la peça durant el funcionament del sistema.

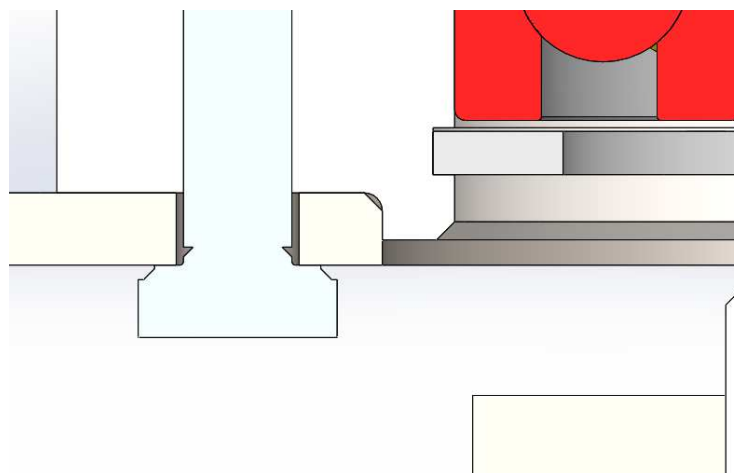


Fig. 81 Ressalt roda inferior. (Font pròpia)

L'ajust no haurà de ser molt fi, ja que això podria dificultar el muntatge de les dues peces, es per això que s'ha escollit l'ajust 30E9h9 que presenta un joc mínim i màxim de 0.04 mm i 0.144 mm respectivament.

Aquest forat en el suport del connector s'haurà de mecanitzar, no tallar amb làser com les altres dimensions.

Consideracions pel muntatge del suport connector

Com s'ha comentat en el disseny de materialització, aquesta peça s'haurà de deformar elàsticament abraçant el conjunt de l'articulació de la mà. Per a que aquesta deformació no sigui excessiva caldrà controlar els valor les cotes de la Fig.82.

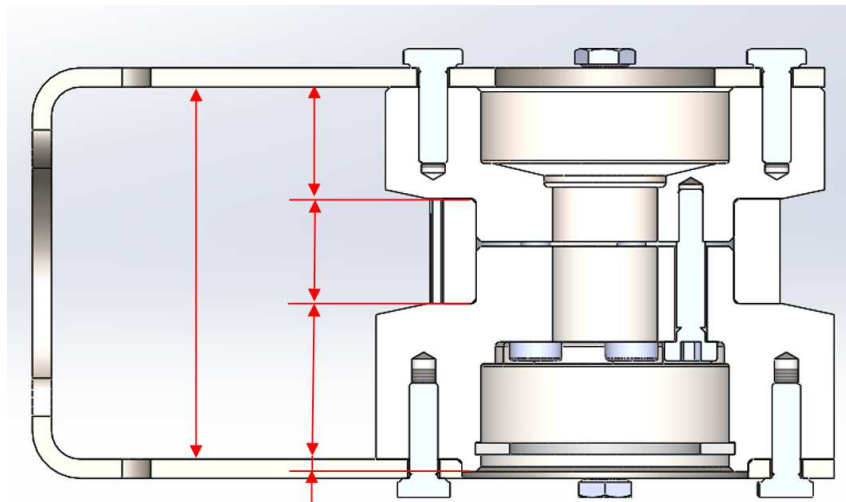


Fig. 82 Cotes conjunt mà. (Font pròpia)

S'ha definit que per a les cotes de les peces de l'interior del suport s'utilitzaran toleràncies ISO 2768-m.

Per tant, l'increment de la cota interior de la xapa que s'haurà de produir en el centre del forat per on passa l'eix és la suma de les desviacions superiors de les cotes indicades a la Fig. 82, el ressalt de la roda inferior de la mà i la desviació inferior de la cota entre les seves dues "ales".

$$f = d_{s1} + d_{s2} + d_{s3} + c_4 + d_{s4} - d_{ix} = 0.2 + 0.2 + 0.2 + 1.3 + 0.05 + 0.3 = 2.15 \quad (50)$$

Per tant aquest seria el valor del desplaçament en mil·límetres a produir en el punt del centre del forat si la cota interior del perfil també fos segons ISO 2768-m

Fent la hipòtesi, molt conservadora, de que la xapa són dues bigues encastades, podem entendre, a grans trets, si aquesta solució es viable.

A la Fig. 78, es pot veure com aquesta hipòtesi és molt conservadora, ja que la peça de la que es parla és molt més flexible que la solució que es proposa per analitzar-la.

Utilitzant la fórmula de la biga encastada i entenent que cada una de les dues ales de la peça haurà de desplaçar la meitat, s'obté la següent força al aplicar la tensió en l'extrem. La distància de l'extrem esquerra al centre del forat son 60 mm, l'amplada de la peça en la zona més ample son 175 mm i la xapa es de 2mm.

$$f/2 = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \rightarrow F = \frac{\frac{2.15}{2} \cdot 3 \cdot 210000 \cdot \frac{1}{12} \cdot 175 \cdot 2^3}{60^3} = 365.5 \text{ N} \quad (51)$$

$$\sigma_{max} = \frac{F \cdot L \cdot t/2}{I} = 188.7 \text{ MPa} \quad (52)$$

Es considera que aquests valors son massa elevats en termes de tensions, ja que el material utilitzat es S235 de 235 MPa de límit elàstic.

S'ha escollit reduir el valor d'aquestes tensions fins a un valor al voltant de 150 MPa.

Com els valors dels desplaçaments, forces i tensions son proporcionals entre ells ràpidament s'ha obtingut el desplaçament desitjat.

$$f = 1.7 \text{ mm}, \quad F = 288 \text{ N}, \quad \sigma_{max} = 148 \text{ MPa} \quad (53)$$

Recuperant l'equació (64) i substituint el valor de f, es troba que la desviació inferior de la cota de l'interior de la xapa ha de ser +0.15 mm.

Un cop la peça està dins el ressalt de la roda inferior, cal collar-la. De la mateixa manera com s'ha fet en l'equació (64) s'analitzarà el cas de quan s'ha de collar la peça ja que no es vol crear tensions excessives a aquesta. La cadena de cotes seguin les indicacions de la Fig. 82 es la següent.

$$f = -d_{i1} - d_{i2} - d_{i3} + d_{ix} = 0.2 + 0.2 + 0.2 + d_{sx} \quad (54)$$

Aplicant de manera anàloga les equacions (65) i (66), es vol trobar la desviació superior de la tolerància que limita les tensions a 100 MPa, i s'obté:

$$\sigma_{max} = 95 \text{ MPa}, \quad d_{sx} = +0.5 \text{ mm} \quad (55)$$

Cal recordar que aquests valors son molt conservadors degut a la hipòtesi que s'ha fet, però d'aquesta manera es pot assegurar que no hi haurà cap inconvenient en el muntatge de la peça, ni tampoc apareixeran tensions excessives. Així doncs la cota interior del suport connector haurà de ser:

$$x = 39_{+0.15}^{+0.5} \text{ mm} \quad (56)$$

Pel que fa referència a la resta de cotes i toleràncies de la peça, s'han seguit els requisits del fabricant del connector. (Staübli, s.d.)

8.6 Ajust politja i rodes

Tal com s'ha vist a l'apartat "7.12 Articulació de la mà" la politja esta fixada per les dues rodes que estan collades per el seu interior amb cinc cargols M5 com es pot veure a la Fig. 83.

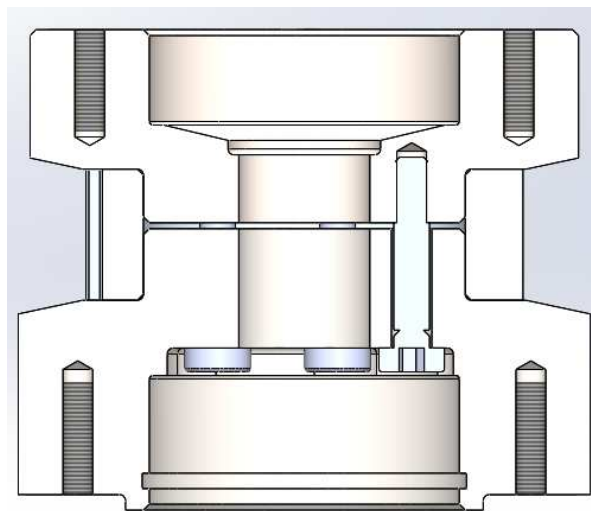


Fig. 83 Fixació politja. (Font pròpia)

Per augmentar el parell disponible que pugui transmetre aquesta unió s'ha cregut convenient que l'ajust de l'interior de la politja sigui amb serratge, ja que això augmenta les forces de fricció entre les peces del conjunt.

L'ajust escollit en aquesta situació és 27H7j6. Aquest ajust és amb interferència lleuger de fàcil muntatge amb un maça o una eina semblant.

D'aquesta manera la cota del diàmetre interior de la politja haurà de ser $\varnothing 27$ H7 mentre que les altres cotes de mecanització d'aquesta són segon ISO 2768-m.

Com es pot veure a la Fig. 83 la roda inferior i superior d'aquesta articulació estan mecanitzades per l'exterior de la politja de manera que actuen com les pestanyes de la politja que es requerien, segons el fabricant, com a mínim en una de les dues politges que estan connectades a la mateixa corretja (Optibelt, s.d.). Aquestes pestanyes estan mecanitzades d'acord amb ISO 5294.

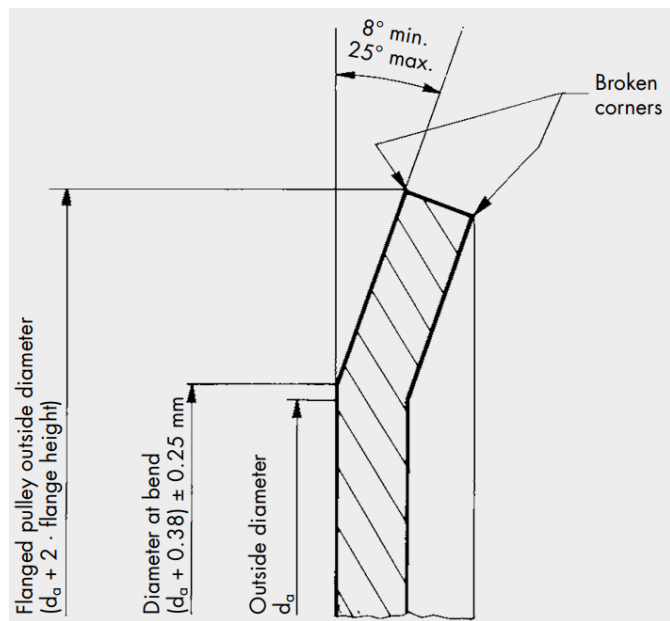


Fig. 84 Requeriments de les pestanyes de politges síncrones. (Optibelt, s.d.)

Les rodes inferior i superior de la mà tenen les mateixes cotes en la part central de la unió amb la politja. És per això, que es recomana al fabricant d'aquestes peces que les mecanitzi a la vegada. D'aquesta manera amb una única passada es podran obtenir les toleràncies desitjades a les dues superfícies, i s'assegurarà un bon paral·lelisme entre inferior i superior sobre les que recolza la politja.

9. Pressupost

En aquest apartat es presenten els costos del projecte desglossant en diferents grups depenen de la seva naturalesa. Finalment es presenta el cost total del projecte

9.1 Pressupost de prototip

Dins aquest apartat es troben els costos associats a la construcció del prototip, tant per la compra dels components o matèries primeres com la fabricació de les peces que es requereixen

COMPONENTS				
Component	Fabricant	Quantitat	Preu unitari	Preu
Movinor LN064-5	Infranor	2	1210	2420
B667	Oriental Motor	1	389	389
CombiTac	Staübli	1	325	325
Acoblament Oldham*	Huco	3	62.86	188.58
Rodaments rígids de boles*	SKF	12	9.86	118.37
Acoblament femella central	Norelem	1	28.24	28.24
Corretja síncrona ZR*	Optibelt	2	9.91	19.82
Unions cargolades	DIN	-	-	43.42
Altres	-	-	-	276.33
TOTAL				3808.76

*Aquests grups de components, tenen models amb els preus unitaris diferents. A la columna preu unitari es mostra la mitja dels preus unitaris dels models.

Per a veure els preus detallats per a cada component veure l'apartat de l'annex "Pressupost Detallat".

MATERIALS			
Material	Quantitat	Preu unitari(€/U)	Preu(€)
Acer E295	2 kg	2.5	5
Xapa alumini 1060 3 mm	500x500	-	46
Xapa acer S235 3mm	400x400	-	36
Alumini 7075	2 Kg	3.2	6.4
TOTAL			93.4

FABRICACIÓ							
Peça	Tall làser i plegat			Mecanitzat			Total peça
	h	€/h	€	h	€/h	€	
Eixos	0	30	0	8	35	280	280
Rodes	0	30	0	10	35	350	350
Braç xapa	4	30	120	0	35	0	120
Tensors	4	30	120	2	35	70	190
Base	0	30	0	3	35	105	105
Suports	0	30	0	3	35	105	105
Politges	0	30	0	2	35	70	70
TOTAL							1220

El cost del prototip es de **5122.16€**.

9.2 Pressupost d'enginyeria

A continuació es presenten el costos associats a l'elaboració del projecte.

RECURSOS HUMANS			
Tasca	Hores	€/hora	Cost (€)
Anàlisi estat de l'art	100	40	4000
Anàlisi del concepte	100	40	4000
Disseny mecànic	290	40	11600
Verificació del disseny	200	40	8000
Documentació	150	40	6000
TOTAL			33600

LLICÈNCIES				
Software	Cost llicència	Durada	Temps ús	Cost(€)
SolidWorks	4350	12 mesos	10 mesos	3625
MatLab	800	12 mesos	10 mesos	666.6
Microsoft Office	315	48 mesos	10 mesos	65.63
TOTAL				4357.23

EQUIPAMENT				
Hardware	Cost compra	Temps amort.	Temps ús	Cost(€)
Monitor	150	48 meses	7 mesos	21.88
TOTAL				21.88

Els costos associats al projecte son **37979.11€**.

9.3 Cost total del projecte

Concepte	Cost (€)
Components	3808.76
Materials	93.4
Fabricació	1220
Recursos humans	33600
Llicències	4357.23
Equipaments	21.88
Benefici Industrial (10%)	4310.13
Import del projecte	47411.40
IVA (21%)	9956.39
TOTAL	57367.79 €

10. Estudi ambiental

Aquest prototip ha sigut dissenyat tenint en ment conceptes important per a l'impacte ambiental en dissenys mecànics.

En tots els elements calculats i verificats del disseny s'ha buscat que els seus cicles a fatiga fossin per sota del seu valor de límit a fatiga. El que permet aquesta condició es que el disseny estigui calculat a vida infinita reduint els residus a llarg termini.

Si hi hagués la situació de fallada en un dels components del sistema, aquesta ha sigut dissenyat per a que qualsevol de les peces pugui ser substituïda de manera fàcil ja que totes les parts del prototip es troben accessibles.

S'ha buscat, en la mesura del possible, que el disseny sigui modular, de manera que cada una de les parts i articulacions del disseny es puguin muntar per separat i posteriorment assemblar els mòduls per a crear el sistema final. Facilitar l'assemblatge a l'operari minimitza els errors que pugui cometre durant el muntatge i per tant redueix el risc de fallada del sistema per aquesta causa.

En cas que, durant els assajos del prototip, es determinés que aquest no es vàlid o que requereix de modificacions, el disseny permet reaprofitar peces i components del seu interior.

Una gran part de les peces del disseny s'aconsegueixen per tall làser, que es un mètode sense cap tipus d'emissions ni l'ús components químics.

En el disseny s'han situat acoblaments elàstics a les sortides dels eixos aïllant així aquests components, que son difícils de reciclar degut al bobinat del seu interior, de les forces externes que puguin actuar sobre el sistema. D'aquesta manera es minimitza la possibilitat de que algun dels actuadors quedi malmès i per tant s'hagi de substituir.

Finalment, per concloure amb aquest apartat, cal recalcar que el disseny que s'ha desenvolupat té intenció de donar avantatge als vehicles elèctrics respecte als de combustible fossi son més contaminants. La sortida al mercat d'aquest sistema impulsaria l'ús dels vehicles elèctrics en entorns industrials ja que retallaria la distància en el seu punt més feble, la recàrrega de la bateria del vehicle

11. Conclusions

L'objectiu principal d'aquest projecte era el disseny d'un prototip per a la automatització del procés de càrrega de vehicles elèctrics industrials.

Per a començar amb el projecte es va realitzar un estudi del funcionament dels vehicles elèctrics industrials. Es va poder veure que en els vehicles industrials no tripulats tots els processos estaven automatitzats, el de càrrega inclòs. Per altre banda els vehicles que requereixen d'un treballador que els operi, també requereixen que sigui el que connecti el vehicle a l'alimentació. Part d'aquest estudi també es va centrar en analitzar les diferents solucions que actualment s'utilitzen per a la carrega automatitzada de vehicles elèctrics.

Per a poder definir unes especificacions que no estaven establertes al principi del projecte es va haver de analitzar el tipus de vehicle sobre el que es volia treballar. Aquest anàlisi va generar uns requeriments que el sistema a dissenyar havia de complir per a poder dur a terme la seva funció, com per exemple el rang de treball del sistema o les forces que havia de generar per a poder connectar el vehicle a l'alimentació satisfactòriament.

Definides les especificacions del disseny, es van considerar un ventall de solucions conceptuals que es van anar descartant fins que únicament va restar l'escollida. Per a poder materialitzar la idea de forma adequada, es va estudiar la solució conceptual obtenint les equacions que la governen.

Amb l'ajuda d'aquestes equacions i les especificacions, es va realitzar un procés iteratiu en el que es s'avançava el disseny i paral·lelament es comprovava la seva validesa. Cal destacar que per falta de temps aquest procés iteratiu no s'ha pogut ajustar fins a optimitzar totes les peces del disseny, i es per això que alguns components estan sobre dimensionats.

Els càlculs del sistema van desvelar que alguns punts del disseny eren crítics, y es van poder solucionar amb una correcte elecció dels materials a utilitzar durant la fabricació.

Finalment per al muntatge del prototip es van generar els plànols de conjunt i una part dels plànols de les peces indicant les toleràncies, acabats i ajustos utilitzats justificant-los adequadament a la memòria.

Aquest sistema ha resultat ser més complex del que s'esperava en un inici. Ha plantejat reptes de forma constant i obligat a prendre decisions que canviaven la direcció del disseny. Gràcies a aquest projecte s'ha pogut entendre la importància del coneixement sobre els materials i tècniques existents en el mon del disseny mecànic.

En etapes futures del projecte, caldria realitzar noves iteracions fins a la optimització de totes les parts del disseny, i altres parts importants per al disseny de producte però no tant per el disseny de prototip com per exemple la seguretat o la lubricació del sistema.

Finalment, tot i que no es pot assegurar que el disseny sigui l'òptim, sí que es pot assegurar que serà completament funcional respecte a les especificacions amb les que ha sigut creat.

Bibliografia

- ABB. (s.d.). *Connector charging solutions for electric bus and e-truck*. Obtenido de <https://new.abb.com/ev-charging/products/depot-connector-charging>
- Arduino. (Febrer de 2018). Scribble is an Arduino-controlled haptic drawing robot.
- Babinec, A., Jurisica, L., Hubinsky, P., & Duchon, F. (2014). Visualization fo mobile robot using artificial markers. Eslovaquia.
- Battery University. (Novembre de 2020). *Choices of primary Batteries*. Obtenido de https://batteryuniversity.com/learn/article/choices_of_primary_batteries
- Endesa. (Novembre de 2019). *Endesa y TMB instalan 2 nuevos pantografos para la recàrگا de autobuses elèctricos de Barcelona*. Obtenido de <https://www.endesa.com/es/prensa/sala-de-prensa/noticias/transicion-energetica/movilidad-electrica/endesa-y-tmb-instalan-2-nuevos-pantografos-para-la-recarga-de-los-autobuses-electricos-de-barcelona>
- Esnova. (2019). *Información práctica Palet Europeo o Europalet*. Obtenido de https://esnova.com/wp-content/uploads/2019/07/palet_europeo.pdf
- Huang, T., Li, Z., Li, M., Chetwynd, D., & Gosselin, C. (Maig de 2004). Conceptual design and dimensional synthesis of a Novel 2-DOF Translational Parallel Robot for Pick-and-Place Operations.
- Huang, T., Mei, J., Li, Z., & Zhao, X. (juliol de 2005). A method for Estimating Servomotor Parameters of a Parallel Robot for Rapid pick-and-place Operations.
- HUCO. (s.d.). Flexible couplings cataogue.
- Ideanamics. (s.d.). *Wave by Ideanamics*. Obtenido de <https://waveipt.com/>
- Igus. (s.d.). *Dissenyador de brços robòtics robolink*. Obtenido de <https://robolink-designer.igus.tools/construction>
- INE. (2020). *Instituto Nacional de Estadística*. Obtenido de Índice de Producción Industrial. (Base 2015): <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=26062#!tabs-grafico>
- Infranor. (Mayo de 2021). *Movinor N (ex-LN)*. Obtenido de <http://www.infranor.com/es/dynasite.cfm?dsmid=83414&pid=430&ppid=300>

- Jungheinrich. (s.d.). *Carretillas elevadoras eléctricas*. Obtenido de <https://www.jungheinrich.es/productos/carretillas-nuevas/carretillas-elevadoras/carretillas-elevadoras-electricas>
- Li, J. (Gener de 2019). Compatibility and Investment in the U.S. Electric Vehicle Market.
- Medea. (2021). *Asociación de Empresas Distribuidoras de Equipos de Manutención*. Obtenido de <https://www.medeas.org.es/informacion-del-sector/>
- Miranda, J. M., & Iglesias, N. (Noviembre de 2015). *Las infraestructuras de recarga y el despegue del vehículo eléctrico*. Obtenido de <https://revistas.ucm.es/index.php/OBMD/article/view/51285>
- Nord-Lock Group. (2021). *Arandelas originales de Nordlock*. Obtenido de <https://www.nord-lock.com/es-es/nord-lock/productos/arandelas-originales/>
- Norelem. (s.d.). *23368 Keyless locking couplings with central nut*. Obtenido de <https://www.norelem.com/us/en/Products/Product-overview/Systems-and-components-for-machine-and-plant-construction/23000-Couplings-Rigid-couplings-Conical-clamping-rings-Cardan-joints-Quick-fit-couplings-Bearings/Shaft-hub-clamping-sets>
- Norelem. (s.d.). 27626 Vástagos articulados con rodamient de bolas i rosca interior.
- Optibelt. (s.d.). *Optibelt ZR*. Obtenido de <https://www.optibelt.com/sp/productos/correas-dentadas-de-caucho/optibelt-zr/>
- Optibelt. (s.d.). Technical manual rubber timing belt drives.
- Oriental Motor. (s.d.). *Oriental Motor ARM46AC-PS36*. Obtenido de <https://catalog.orientalmotor.com/item/ar-series-42mm-stepper-motors/ar-series-42mm-closed-loop-stepper-motors/arm46ac-ps36>
- Pérez, J., Nashashibi, F., Lafeudeux, B., Resende, P., & Pollard, E. (Febrero de 2013). Autonomous Docking Based on Infrared System for Electric Vehicle Charging in Urban Areas.
- Quintana, L. (2021). *Carretillas elevadoras: automatización, eficiencia y sostenibilidad*. Obtenido de Interempresas: <https://www.interempresas.net/Logistica/Articulos/352341-x.html>
- Schneider Electric. (s.d.). *Delta robots for pick & place solutions*. Obtenido de Lexium T, P: <https://www.se.com/ww/en/product-range/63074-lexium-t-p/?filter=business-1->

industrial-automation-and-control&parent-subcategory-id=2915

Schneider Electric. (s.d.). *Motor paso a paso trifás. 1,7 Nm*. Obtenido de <https://www.se.com/es/es/product/BRS368W130ACB/motor-paso-a-paso-trif%C3%A1s.-1%2C7-nm---eje-%C3%B88-mm---l%3D79-mm---sin-freno---conector/>

SKF. (Gener de 2019). *Catálogo de rodamientos SKF*. Obtenido de https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-Rolling-bearings---17000_1-ES_tcm_201-121486.pdf

SKF. (Gener de 2019). *Disposiciones y sus tipos de rodamientos*. Obtenido de <https://www.skf.com/es/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/bearing-type-and-arrangement/arrangements-and-their-bearing-types>

Stäubli. (s.d.). *Combitac Main catalog*.

Toyota. (Juliol de 2017). *Toyota material handling northern california*. Obtenido de <https://www.tmhnc.com/blog/toyota-forklift-parts-and-repair-bay-area-salinas-fresno-sacramento>

Toyota. (s.d.). *Forklift battery charging methods*.

TR Fastenings. (s.d.). *M6 self clinching nut TR Fastenings*. Obtenido de <https://www.trfastenings.com/products/catalogue/fasteners-for-sheet-metal/hank-self-clinch-fasteners/nuts/standard/TR00030054-100>

Volkswagen. (2019). *The mobile charging robot*. Obtenido de <https://www.volkswagenag.com/en/brands-and-models/group-components/innovations-e-mobility.html>

Félez, J., & Martínez, M. L. (2008) *Ingeniería gráfica y diseño*. Madrid, España : Editorial Síntesis

Budynas, R. G., & Nisbett, J, K (2012) *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*.

Riba, C. (2004) *Disseny de Màquines V. Metodologia*. Barcelona, España : Edicions UPC