

Centre universitari adscrit a la



Enginyeria mecànica

**DISSENY I VALIDACIÓ D'UN EXOESQUELET INDUSTRIAL PASSIU PER LA
COMPENSACIÓ GRAVITACIONAL DEL BRAÇ**

Memòria

Andrea Jiménez Aguilera

PONENT: Dr. Joan Ramon Gomà Ayats

CURS ACADÈMIC 2023/2024



Resum.

Davant l'increment notable d'incidències relacionades amb trastorns musculoesquelètics (TME) causats per sobreesforços en l'entorn laboral, han sorgit diferents estratègies de mitigació, com venen a ser l'ús d'exoesquelets en entorns industrials. En el present projecte es proposa el disseny d'un model virtual d'un exoesquelet passiu, denominat EXOumerus. Aquesta solució està orientada al suport dels braços per a activitats exercides prolongadament per sobre de l'altura de les espatlles. Es duu a terme l'anàlisi i simulació mitjançant el programari SolidWorks (SW), permetent la validació de l'assistència i efectivitat del model. Els models de tallatge S/M i L/XL proposats ofereixen un parell de compensació gravitacional màxim de 16,5 N·m i 33N·m respectivament, presentant el seu potencial com a solució en la prevenció de TME en la indústria.

Resumen.

Ante el incremento notable de incidencias relacionadas con trastornos musculoesqueléticos (TME) causados por sobreesfuerzos en el entorno laboral, han surgido diferentes estrategias de mitigación, como vienen a ser el uso de exosqueletos en entornos industriales. En el presente proyecto se propone el diseño de un modelo virtual de un exosqueleto pasivo, denominado EXOumerus. Esta solución está orientada al soporte de los brazos par actividades ejercitadas prolongadamente por encima de la altura de los hombros. Se lleva a cabo el análisis y simulación mediante el software SolidWorks (SW), permitiendo la validación de la asistencia y efectividad del modelo. Los modelos de talla S/M i L/XL propuestos ofrecen un par de compensación gravitacional máxima de 16,5N·m i 33N·m respectivamente, presentando su potencial como solución en le prevención de TME en la industria.

Abstract.

Given the significant increase in incidents related to musculoskeletal disorders (MSDs) caused by physical overexertion in the workplace, various mitigations strategies have emerged, such as the use of exoskeletons in industrial environments. In this project, the design of a virtual model of a passive exoskeleton, named EXOumerus, is proposed. This

solution is aimed at supporting the arms for activities carried out for prolonged periods above shoulder height. The analysis and simulation are carried using SolidWorks (SW) software, allowing the validation of the assistance and effectiveness of the model. The proposed S/M and L/XL size models offer a maximum gravitational compensation torque of 16N·m and 33N·m respectively, presenting their potential as a solution for the prevention of MSDs in the industry.

Índex.

Índex de figures.....	V
Índex de taules.....	XI
Glossari de termes.....	XV
1. Objectius.....	1
1.1. Propòsit.....	1
1.2. Finalitat.....	1
1.3. Objecte.....	1
1.4. Abast.....	1
1.5. Context en les línies de recerca i transferència de coneixement del Tecnocampus.	2
2. Antecedents i necessitats d'informació.....	3
2.1. Marc conceptual.....	3
2.1.1. Definició i concepte.....	3
2.1.2. Estat del art.....	3
2.1.3. Tipus existents.....	5
2.1.4. Diferències entre EXO passiu i actiu.....	7
2.1.5. Aplicacions dels EXO passius.....	7
2.1.6. Aplicacions dels EXO actius.....	8
2.1.7. Solucions existents.....	9
2.1.8. Avantatges i limitacions de les tecnologies actuals.....	10
2.1.9. Justificació.....	19
2.1.10. Normativa d'estandardització.....	21
2.2. Marc teòric.....	22

2.2.1.	Anàlisi de biomecànica.....	22
2.2.2.	Anàlisi d'antropometria.....	26
3.	Objectius i especificacions tècniques.....	30
4.	Generació i plantejament de possibles solucions alternatives.....	33
4.1.	Solucions d'actuadors.....	33
4.1.1.	Contra pes.....	33
4.1.2.	Molla de parell constant i variació de la distància al punt de fulcre.....	34
4.1.3.	Molla helicoidal cilíndrica d'extensió o compressió amb politja de radi variable... ..	35
4.2.	Articulacions.....	36
4.3.	Materials tèxtils i escumes.....	38
4.4.	Materials estructurals.....	39
5.	Selecció de l'alternativa més adequada.....	41
5.1.	Selecció de l'actuador passiu.....	41
5.2.	Selecció d'articulacions.....	46
5.3.	Selecció de materials tèxtils i escumes.....	48
5.3.1.	Corretges de suport.....	48
5.3.2.	Plaques de suport i encoixinat.....	49
5.3.3.	Materials transpirables.....	50
5.4.	Selecció dels materials estructurals.....	50
6.	Desenvolupament del disseny.....	53
6.1.	Disseny conceptual.....	53
6.2.	Càlculs i disseny.....	55
6.2.1.	Càlcul del parell generat en l'articulació glenohumeral.....	55
6.2.2.	Càlcul de la ubicació del centre de gravetat en la Situació 2.b.....	61

6.2.3.	Càlcul de la longitud de barra per a la compensació gravitacional.	62
6.2.4.	Tallatge i adaptabilitat.	64
6.2.5.	Selecció de la molla.	66
6.2.6.	Càlcul voltes mínimes del cable tensor.	68
6.2.7.	Càlcul del diàmetre de cable tensor.	69
6.2.8.	Verificació de l'eficiència de la molla en la compensació gravitacional.	70
6.2.9.	Càlcul de les longituds del conjunt <i>b</i>	72
6.2.10.	Força màxima d'assistència dels models.	73
6.2.11.	Càlcul de pandeig.	77
6.3.	Simulacions CAD.	78
6.3.1.	Conjunt <i>b</i>	79
6.3.2.	Conjunt <i>a</i>	85
6.3.3.	Conjunt <i>z</i>	87
7.	Disseny final.	93
7.1.	Propietats mecàniques dels materials estructurals seleccionats.	95
7.1.1.	Fibra de Carboni T1700 K12.	95
7.1.2.	Nylon 6 (PA Tipus 6).	97
7.2.	Conjunt <i>z</i>	98
7.2.1.	Disseny de la molla de parell constant.	100
7.2.2.	Disseny dels tambors.	101
7.2.3.	Disseny del cable.	102
7.3.	Conjunt <i>b</i>	104
7.4.	Conjunt <i>a</i>	106
7.5.	Conjunt d'interfície amb el maluc.	108
7.6.	Arnès.	109

8. Validació final del model.	111
8.1. Càlcul del perfil de compensació del parell.	111
8.2.1. Variació de F_2 degut a la variació angular.....	111
8.2.2. Efecte del pes propi dels conjunts en el parell d'assistència.	112
8.2.3. Discussió sobre el comportament del parell d'assistència.	113
8.3. Moviments permesos pel model EXOumerus.....	114
9. Planificació.....	121
9.1. Fase 1: Avantprojecte.	124
9.2. Fase 2: Memòria intermèdia.....	126
9.3. Fase 3: Memòria final i defensa del projecte.	128
9.4. Seguiment del progrés i desviacions.	130
9.5. Gestió de riscos i pla de contingència.	130
9.5.1. Identificació de riscos potencials.	130
9.5.2. Anàlisi qualitatiu.	132
9.5.3. Pla de contingència.....	134
10. Impacte mediambiental.	137
10.1. Accions impactants.	137
10.2. Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS).....	138
11. Perspectiva de gènere.	139
12. Futures implementacions.....	141
13. Conclusions.	144
15. Referències.	147

Índex de figures.

Fig. 2.1: Percentatge de presència dels EXO passius en vers actius.	7
Fig. 2.2: Anatomia muscular del tronc superior.....	13
Fig. 2.3 Confort percebut en relació a mides antropomètriques i gènere.....	14
Fig. 2.4: Gràfica de la relació del parell d'assistència amb l'angle del braç.....	16
Fig. 2.5: Parell gravitacional produït a l'articulació glenohumeral.....	17
Fig. 2.6: Gràfiques de compensació de el parell gravitacional	18
Fig. 2.7: Estadística d'accidents de treball en jornada amb baixa laboral	19
Fig. 2.8 Estadística d'accidents de treball per sector	20
Fig. 2.9: Estadística d'accidents de treball per causa de lesions.....	21
Fig. 2.10: Tres plans cardinals del cos.....	22
Fig. 2.11: DoF en l'articulació glenohumeral.....	23
Fig. 2.12: Moviments naturals de l'articulació glenohumeral.....	23
Fig. 2.13: Moviments escapulars.....	24
Fig. 2.14: Moció de la columna vertebral	25
Fig. 2.15: Gràfica de la distribució d'alçada de la població global.....	27
Fig. 2.17: Circumferència mesurada en cm de dones i homes.....	27
Fig. 2.16: Proporcions generals del cos humà.....	28
Fig. 4.1: Diagrama simplificat de la proposta d'actuador per contrapès.	34
Fig. 4.2: Diagrama simplificat de la proposta d'actuador per molles de parell constant. ...	34

Fig. 4.3: Diagrama simplificat de la proposta d'actuador per Molla helicoidal cilíndrica de compressió amb politja de radi variable.....	35
Fig. 4.4: Il·lustració dels components generals de l'estructura del model	36
Fig. 4.5: Diagrama de les possibles alternatives de materials tèxtils i escumes	38
Fig. 5.1: Iteracions del radi de la politja	45
Fig. 5.2: Parell de compensació gravitacional de la solució molla helicoidal cilíndrica d'extensió o compressió en vers al parell gravitacional del braç	45
Fig. 5.3: Mètode ponderat normalitzat de la selecció multicriteri del material per a les cingles de l'arnès	48
Fig. 5.4: Mètode ponderat normalitzat de la selecció multicriteri del material per a les plaques de suport i encoixinat.	49
Fig. 5.5: Mètode ponderat normalitzat de la selecció multicriteri del material per a les plaques de suport i encoixinat.	50
Fig. 5.6: Mètode ponderat normalitzat de la selecció multicriteri del material per les barres estructurals del model.....	50
Fig. 6.1: Diagrama del EXOumerus	53
Fig. 6.2: Divisió en conjunts del model EXOumerus.	54
Fig. 6.3: Situació 1. Diagrama de posició del braç on es presenta un parell més elevat	56
Fig. 6.4: Gràfica del moment patit en l'espatlla depenent de la inclinació del braç en	57
Fig. 6.5: Situació 2. Diagrama de posició de l'avantbraç durant l'elevació del braç	57
Fig. 6.6: Perfil del parell generat en la situació 2a.....	58
Fig. 6.7: Centre de gravetat del conjunt del braç	61
Fig. 6.8: Diagrama de cos lliure de la barra b	62

Fig. 6.9: Molla ‘Contorque’ X8U84.....	66
Fig. 6.10: Diagrama d’esforços interns de la barra b	70
Fig. 6.11: Diagrama de les longituds de les barres del conjunt b en la seva màxima longitud	72
Fig. 6.12: Dimensions en l’extensió màxima del subconjunt b.	73
Fig. 6.13: Diagrama de cos lliure barra b sense pes addicional	80
Fig. 6.14: Resultat d’anàlisi de tensions barra b en la situació 1: sense pes addicional.....	81
Fig. 6.15: Resultat de la simulació d’avaluació del factor de seguretat conjunt b en la situació 1: sense pes addicional	82
Fig. 6.16: Carregues i punt d’aplicació en el braçalet de subjecció del braç situació 1 amb pes addicional.	83
Fig. 6.17: Carregues aplicades i fixacions en la simulació del braçalet del braç en la Situació 1: parell màxim de compensació	83
Fig. 6.18: Resultat d’anàlisi de tensions del braçalet del braç en la situació 1 amb pes addicional.	84
Fig. 6.19: Resultat de la simulació del factor de seguretat de el braçalet del braç en la situació 1: parell màxim de compensació	85
Fig. 6.20: Forcés i subjeccions aplicades en el “Conjunt a” simulació de pandeig	86
Fig. 6.21: Resultat de l’anàlisi de pandeig en el conjunt a.....	86
Fig. 6.22: Segon resultat de l’anàlisi de pandeig en el conjunt a	87
Fig. 6.23: Carregues i punt d’aplicació en l’element la placa de subjecció en el model L/XL	88
Fig. 6.24: Càrregues aplicades i fixacions en la placa de subjecció en el model L/XL	88
Fig. 6.25: Anàlisi topològic placa de subjecció.....	90

Fig. 6.26: Redisseny del component de suport de les molles.	90
Fig. 6.27 Resultat de les tensions Von Mises per a la simulació del la placa de subjecció en el model L/XL	91
Fig. 6.28: Resultat de la simulació del factor de seguretat de en element placa de subjecció de les molles en el model L/XL	92
Fig. 7.1: Disseny estructural del mecanisme d'assistència EXOumerus.	93
Fig. 7.2: Punts de fixació de les futures implementacions modulars.....	94
Fig. 7.3: Vista isomètrica del renderitzat del conjunt z.....	98
Fig. 7.4: Vista d'especejament del conjunt z.....	98
Fig. 7.5: Configuració de les molles de parell constant en els models S/M i L/XL	100
Fig. 7.6: Tambor de transmissió del parell.....	102
Fig. 7.7: Cable tensor d'acer inoxidable D2x1154.	102
Fig. 7.8: Fixació del cable tensor en el conjunt b	103
Fig. 7.9 Fixació en el conjunt z.....	103
Fig. 7.10: Imatge renderitzada del conjunt b	104
Fig. 7.11: Vista d'especejament del conjunt b.....	104
Fig. 7.12: Vista d'especejament del subconjunt de bloqueig telescòpic.....	105
Fig. 7.13: Vista isomètrica del renderitzat del conjunt a.....	106
Fig. 7.14: Vista d'especejament del conjunt a.....	107
Fig. 7.15: Vista isomètrica del renderitzat del conjunt d'interfície amb el maluc	108
Fig. 7.16: Vista d'especejament del conjunt d'interfície amb el maluc.....	108
Fig. 7.17: Disseny inicial de l'arnès tou per el suport de l'exoesquelet	110

Fig. 8.1: Angle d'inclinació del cable tensor amb $l_{a \min}$ i $l_{b2 \max}$.	111
Fig. 8.2: Parell gravitacional vs parell d'assistència	113
Fig. 8.3: Valor de l'error màxim en la transmissió del parell.	114
Fig. 8.4: Flexió i extensió de l'espatlla d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOumerus.	115
Fig. 8.5: Abducció i adducció horitzontal de l'espatlla d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOumerus.	116
Fig. 8.6: Adducció i abducció vertical de l'espatlla d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOumerus.	116
Fig. 8.7: Rotació interna i externa de l'espatlla d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOumerus	117
Fig. 8.8: Protracció, retracció i rotació escapular d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOumerus.	117
Fig. 8.9: Flexió frontal i posterior de la columna d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOumerus.	118
Fig. 8.10: Rotació de la columna d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOumerus.	119
Fig. 10.1: Diagrama de GANT de la fase 1 del projecte.	126
Fig. 10.2: Diagrama de GANT de la fase 2 del projecte.	128
Fig. 13.1: Diagrama simplificat del mòdul de compensació de l'avantbraç	141
Fig. 13.2: Diagrama del mecanisme telescòpic i la transmissió angular per cable tensor	142
Fig. 13.3: Diagrama de cos lliure dels elements del mòdul	143
Fig. 13.4: Diagrama de cos lliure del model base	143

Índex de taules.

Taula 2.1: Evolució dels exoesquelets	5
Taula 2.2: Models en el mercat	9
Taula 2.3: Requisits dels usuaris.....	11
Taula 2.4: Efecte en l'activitat muscular	12
Taula 2.5: Efecte en el cost cardíac.....	15
Taula 2.6: Rang de moviment de l'articulació glenohumeral.....	24
Taula 2.7: Rangs de moviment de l'articulació esternoclavicular	25
Taula 2.8: Rangs de moviment de la columna vertebral.....	26
Taula 2.9: Mitja de pes i altura en Europa, homes i dones.	26
Taula 2.10: Dades antropomètriques generals del centre de gravetat i pes de les extremitats	29
Taula 3.1: Rangs de moviments naturals de l'espatlla, escàpula i esquena.....	30
Taula 4.1: Selecció de sis diferents combinacions d'articulacions.....	37
Taula 6.1: Parell de l'articulació glenohumeral dependent del pes i alçada de l'usuari.....	60
Taula 6.2: Classificació de tallatge segons alçada i pes.....	64
Taula 6.3: Força d'assistència dels models depenent de l'avantatge mecànic del sistema-Situació 2.b.	74
Taula 6.4: Força d'assistència dels models depenent de l'avantatge mecànic del sistema – Situació 1.	76
Taula 6.5: Valors de la simulació del conjunt b sota situació 1: sense pes addicional	80

Taula 6.6: Valors utilitzats per a la simulació Situació 1 amb pes addicional.	84
Taula 6.7: Valors utilitzats per a la simulació del la placa de subjecció en el mode XL/L	89
Taula 7.1: Longituds totals i rangs de regulació de longitud de les barres.....	95
Taula 7.2: Propietats de la matriu de fibra de carboni T700-12-k amb base de resina epòxid Araldite LY-5052.	95
Taula 7.3: Propietats mecàniques del Nylon 6.	97
Taula 7.4: Pes individual i total dels components del conjunt b.	99
Taula 7.5: Pes individual i total dels components del conjunt b.	105
Taula 7.6: Pes individual i total dels components del conjunt a.....	107
Taula 7.6: Pes individual i total dels components del conjunt d'interfície.	109
Taula 7.7: Mesures del cinturó lumbar.	110
Taula 10.1: Taula de recursos de les dependències nivell 1	123
Taula 10.3: Programació setmanal de les hores dedicades en la fase 1	124
Taula 10.4: Tasques fase 1, les seves durades i prelacions.....	124
Taula 10.5: Programació setmanal de les hores dedicades en la fase 2.....	126
Taula 10.6: Tasques fase 2, les seves durades i prelacions.....	127
Taula 10.7: Calendari il·lustratiu de les hores de treball en la fase 3.....	128
Taula 10.8: Tasques fase 3, les seves durades i prelacions.....	129
Taula 10.9: Riscos potencials identificats	131
Taula 10.10: Matriu de probabilitat i impacte	133
Taula 10.11: Valoració dels riscos	133

Taula 10.12: Pla de prevenció i contingència dels riscos	134
Taula 11.1: Taula que recull les accions impactants del projecte.	137
Taula 14.1: Valoració d'assoliment dels objectius i especificacions tècniques.....	145
Taula 14.2: Valoració d'assoliment dels objectius de rangs moviment.....	146

Glossari de termes.

3D	Tres dimensions
a	Acceleració
ABS	Acrilonitril Butadiè Estirè
AP	Eix anterior-posterior
CAD	Disseny assistit per ordinador (<i>Computer Aided Design</i>)
CF	Carbofibra
DoF	Graus de llibertat (<i>Degrees of freedom</i>)
EES	Sistema d'emmagatzematge d'energia elàstica
EVA	Etilè Acetat de Vinil
EXO	Exoesquelet
EXO _{BK}	Exoesquelet d'Esquena (<i>Back exoskeleton</i>)
EXO _{UL}	Exoesquelet de Braços (<i>Upper limb exoskeleton</i>)
F	Força
INSST	Institut Nacional de Seguretat i Salut en el Treball
m	Massa
ML	Eix lateral-medial
MVC	Contraccions voluntàries màximes
NTP	Notes Tècniques de Prevenció
ODS	Objectius de Desenvolupament Sostenible

POM	Poliactal
ppm	Pulsacions per minut
PVC	Clorur de polivinil
RPE	Índex d'esforç percebut (Rate of Percived Exertion)
SUS	Escala d'usabilitat del sistema (<i>System Usability Scale</i>)
TB	Tera bites
TME	Trastorns Musculoesquelètics
TPE	Elastòmers termoplàstics

1. Objectius.

1.1. Propòsit.

El propòsit d'aquest projecte és el disseny d'un model d'exoesquelet passiu amb la funció de compensació del pes de les extremitats superiors de l'usuari mitjançant un sistema d'emmagatzematge d'energia potencial elàstica.

1.2. Finalitat.

La finalitat del projecte és dissenyar una solució d'exoesquelet que compensi les forces gravitacionals del braç de l'usuari. Es pretén proporcionar una solució amb dimensions ajustables per garantir l'adaptabilitat a l'usuari i respectar el rang de moviment de l'articulació glenohumeral i l'esquena.

1.3. Objecte.

L'objecte d'aquest projecte és el model CAD d'un exoesquelet passiu d'assistència en tasques realitzades per sobre de les espatlles, així com la memòria completa de la seva anàlisi i estudi de viabilitat.

1.4. Abast.

El projecte abasta des de la conceptualització inicial del disseny d'EXOumerus fins a la seva validació a través de l'anàlisi matemàtica i simulacions amb SolidWorks. Es consideren diversos factors, incloent-hi l'ergonomia, la seguretat, la facilitat d'ús, i l'eficàcia del parell proporcionat per l'exoesquelet. Addicionalment, s'explora la viabilitat tècnica i econòmica de la producció d'EXOumerus, amb l'objectiu de fer-lo accessible per a la seva implementació en el sector industrial.

El projecte no contempla la construcció física, el prototipatge de l'exoesquelet o la seva homologació. Se centra exclusivament en el disseny i simulació virtual mitjançant el programari SolidWorks.

El disseny està orientat específicament per al suport de tasques repetitives o prolongades realitzades per sobre del cap en entorns industrials. El propòsit del disseny és proporcionar suport en tasques exigents, sense augmentar les capacitats humanes. No es consideren altres àrees d'aplicació.

1.5. Context en les línies de recerca i transferència de coneixement del Tecnocampus.

Durant el desenvolupament del projecte, s'han aplicat de manera efectiva els coneixements i competències adquirides al llarg del grau d'enginyeria mecànica. En especial, s'han aplicat les metodologies de disseny mecànic, simulació per ordinador i anàlisi dels materials corresponents a les assignatures: Màquines i Mecanismes I i II, Expressió Gràfica, Modelització i Enginyeria de Materials.

En l'aspecte del d'impacte ambiental, s'han aplicat els coneixements obtinguts a l'assignatura de Sostenibilitat relacionats amb la responsabilitat amb el medi ambient.

L'estructuració i realització del projecte està basada en les estratègies i principis apresos en Gestió de Projectes I i II. Les assignatures han proporcionat una base teòrica respecte a l'estructuració i realització de projectes impartits així com l'ús d'eines de gestió de projectes com Microsoft Project.

Altres coneixements tècnics i teòrics relacionats amb les assignatures d'Estructures i Construccions Industrials i Disseny de Màquines han ajudat en l'anàlisi i aplicació de normativa.

2. Antecedents i necessitats d'informació.

2.1. Marc conceptual.

2.1.1. Definició i concepte.

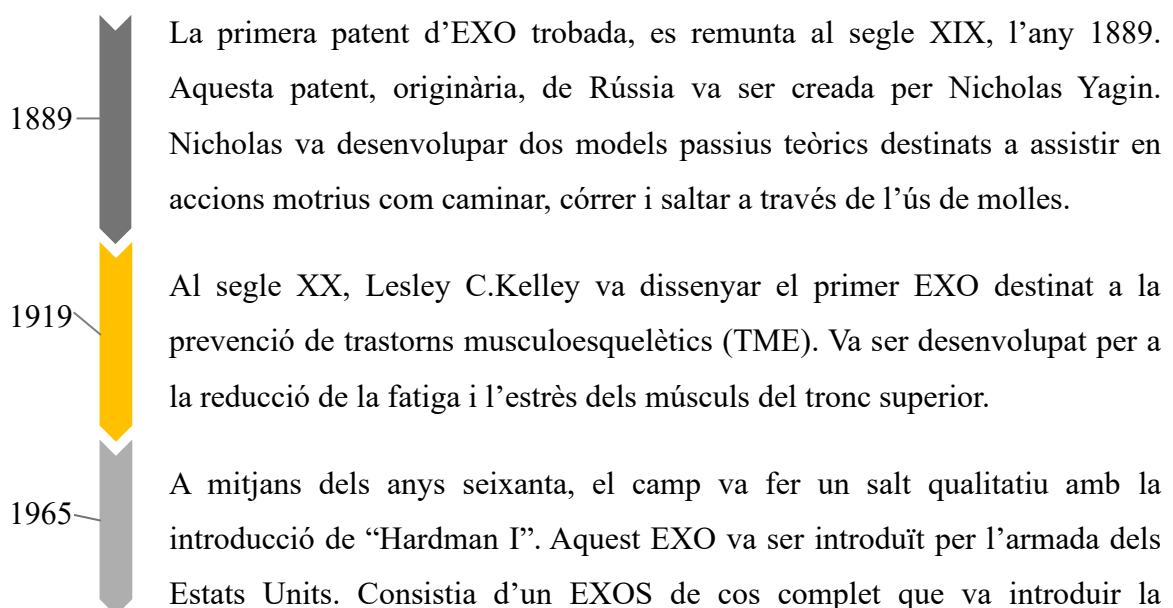
El concepte d'exoesquelet (EXO) ve definit pel ministeri de treball en les notes tècniques de prevenció “dispositius externs portàtils amb l'objectiu d'incrementar les capacitats” [1]. Aquesta definició general s'aplica tant en l'àmbit animal com en l'humà.

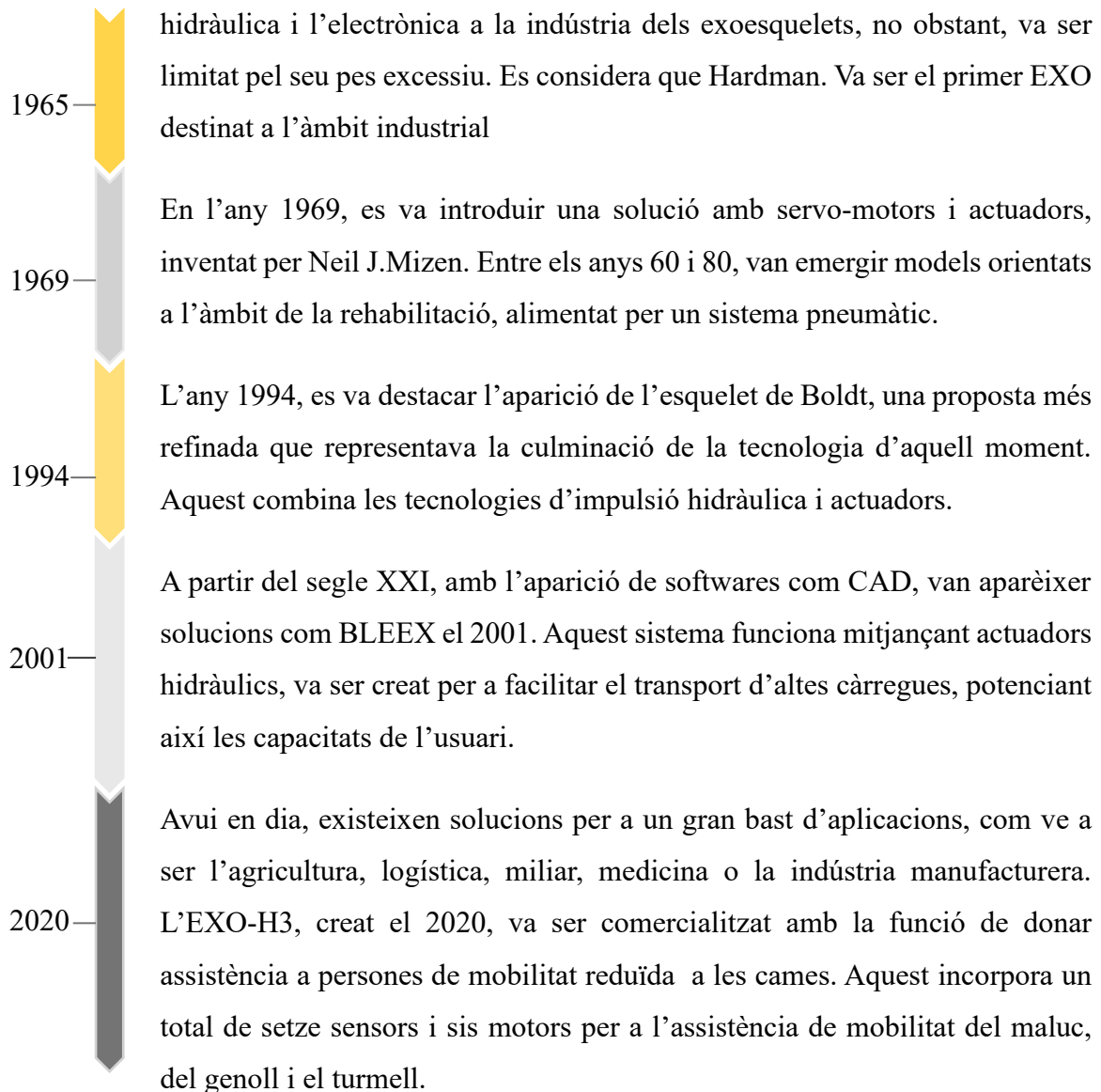
Així doncs, en el regne animal, en especial entre els artròpodes, un exoesquelet és una estructura rígida que proporciona suport estructural. Per altra banda, la definició aplicada al mecanisme d'assistència es defineix com un marc extern que assisteix al moviment o suport de càrregues externes o parts del cos.

2.1.2. Estat del art.

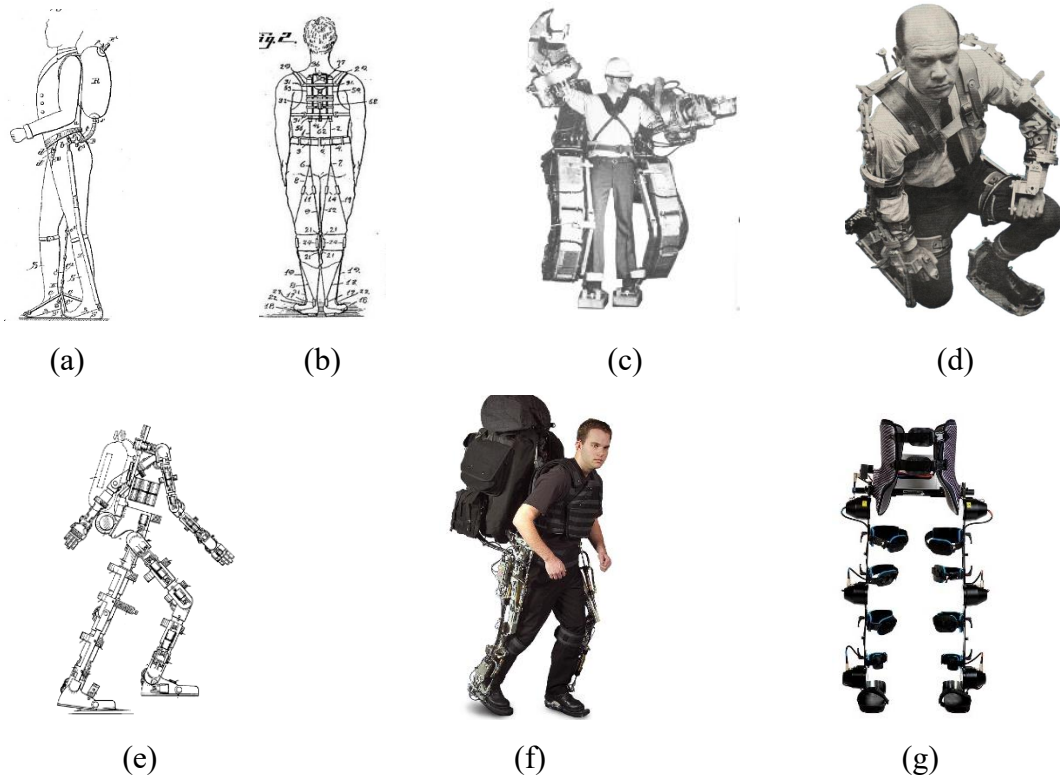
Segons els articles de J.Tejera et. al redactat el 2020 [2] i l'article d'eksoBioniks redactat el 2022 [3], el camp dels EXO ha experimentat una remarcable evolució des dels seus inicis.

A continuació es proporciona una sinterització de l'evolució dels exoesquelets, des dels prototips inicials fins a les solucions disponibles avui en dia.





Els avenços recents mostren un augment en la personalització, millor integració amb la biomecànica i major varietat de models personalitzats per a funcions en específic. Avui en dia les aplicacions i accessibilitat d'aquestes solucions ha augmentat significativament, ampliant i popularitzant el seu ús no només en el sector militar i revalidació, sinó en qualsevol àmbit laboral físicament exigent.

Taula 2.1*Evolució dels exoesquelets*

Nota: Representació cronològica de l'evolució dels EXOs des de l'any 1889 fins al 2020.

Font: (a) [4]; (b) [5]; (c) - (e) [6]; (f) [7] i (g) [8].

2.1.3. Tipus existents.

Segons l'article redactat el 2020 per la Tejera et al. [2] i la nota tècnica redactada pel ministeri de treball i economia social (2021) [1], la categorització general dels exoesquelets presents en el macat es classifiquen segons el tipus de mecanisme que utilitzen, a quines zones del cos ajuden, tipus d'estructura, el tipus de suport que proporciona, la seva finalitat o segons les seves aplicacions.

a) Segons el tipus de mecanisme:

- Actius:
Utilitzen component elèctriques o pneumàtiques per assistir en els moviments.
Són categoritzats com màquines o robots.
- Passius:

Fan servir l'energia generada per l'usuari. Es basen en la mecànica simple utilitzant dispositius d'emmagatzematge d'energia elàstica com bandes elàstiques o molles entre d'altres.

b) Segons a quines zones del cos ajuden:

Aquesta categoria ve dividida segons les parts del cos per les quals està destinat l'exoesquelet. Sent les més comunes:

- Cos sencer
- Cos superior
 - Esquena (EXO_{BK})
 - Braços (EXO_{UL})
- Cos inferior
- Segment específic
- Articulació específica
- Altres

c) Segons la seva estructura:

- Rígid
- Tou

d) Segons tipus d'actuador:

- Actuador elèctric
- Actuador hidràulic
- Actuador pneumàtic
- Híbrid
- Sistema mecànic
- Altres

e) Segons la seva finalitat:

- Rehabilitació
- Rendiment

f) Segons les seves aplicacions:

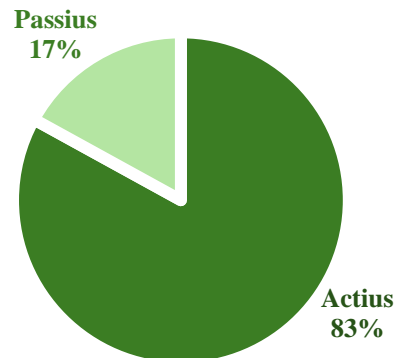
- Militar
- Clínic
- Recerca
- Industrial

- Civil
- Altres camps

2.1.4. Diferències entre EXO passiu i actiu.

Fig. 2.1

Percentatge de presència dels EXO passius en vers actius.



Nota: Percentatge de disseny present d'EXOs passius i actius. *Font:* [2]

Com bé mostra la Fig. 2.1, existeix més presència de disseny d'EXOs actius que passius. Aquest fet pot ser a causa que els EXOs actius disposen d'una àmplia varietat de tecnologies que capaciten al model per assistir amb majors forces i amb un pes del model negligible. Aquests són capaços de potenciar la força de l'usuari o fins i tot executar moviments en persones amb problemes motrius.

Els models passius són utilitzats en usos més limitats. Són emprats en tasques per a persones que volen o precisen un augment lleuger del rendiment i disminució de la fatiga.

2.1.5. Aplicacions dels EXO passius.

Els EXO passius s'utilitzen per entorns on es requereix un dispositiu lleuger que proporcioni assistència en una tasca determinada, repetitiva o prolongada.

1. Prevenció de lesions en la indústria de l'automòbil, metal·lúrgia, construcció i manufacturera

Algunes de les empreses que apliquen aquestes tecnologies acostumen a ser en el sector manufacturer.

Es té el coneixement que a Espanya, actualment existeixen diverses empreses que apliquen aquestes solucions. L'empresa Telice, ha integrat tres models d'EXO passius [9]. Utilitzen:

1. Un model d'assistència lumbar per a l'aixecament de càrregues
2. Un d'assistència de cames per a treballar en altures baixes que requereixen la flexió prolongada de les cames.
3. Un model per al suport de braços i avantbraços per tasques d'instal·lació i manteniment de catenària de trens.

Una altra companyia que aplica aquestes tecnologies passives són Ford o Iveco, on predominen l'ús d'EXO passius d'esquena i de subjecció de braços [9].

2. Atenció mèdica.

S'han trobat registres de l'ús d'EXO passius en el personal mèdic encarregat d'assistir pacients, en especial en resistències on predomina l'ús d'EXO d'esquena per reduir la càrrega lumbar [10].

Així com en la rehabilitació de moviment en extremitats amb mobilitat parcial.

2.1.6. Aplicacions dels EXO actius.

En contraposició a les ampliacions on s'utilitzen EXO passius, les ampliacions dels actius busquen el potencialment del rendiment de l'usuari [11]. Aquests busquen oferir una assistència dinàmica.

1. Indústria de l'automòbil, metal·lúrgica, construcció i manufacturera.

S'usen per a la realització de tasques repetitives o de manipulació de càrregues pesades. Com la instal·lació de llantes o cablejat en automòbils.

2. Ús mèdic.

El sector mèdic presenta una adopció creixent de l'ús d'aquests per a facilitar el moviment en persones de mobilitat reduïda o paralitzades. Són especialment útils per a la recuperació d'accidents cerebrovasculars, lesions cerebrals i condicions neuromotors [10].

3. Militar.

Aquests presenten una gran funcionalitat per a tasques de detecció de bombes, transport de càrregues pesades com armes.

2.1.7. Solucions existents.

A causa de l'augment de companyes emergents [12], s'han trobat una gran varietat d'EXO_{UL} disponibles en el mercat. No s'esmenten tots en aquest informe, es mostren aquells més comercialitzats, que presenten més informació o aporten atributs o funcions distintives. No obstant això, la informació disponible sobre els models comercialitzats majoritàriament és limitada per temes de confidencialitat.

Taula 2.2

Models en el mercat

Fabricant o empresa comercialitzadora	Model	Talles	Pes (kg)	Parell (Nm) o suport(kg)	Tipus de mecanisme	Tecnologies addicionals
Auxivo AG	DeltaSuit	S/M	1,15	5,2Nm	Marc Rígid	Mecanisme telescòpic
		L/XL	2,25	6,6Nm	Compensació	
	OmniSUit	Ajustable	1,99	-	Marc Rígid Compensació	Mecanisme telescòpic
Ottobock SE & Co. KGaA	IX Shoulder air	Ajustable	1,99	-	Molles i cables tensors	-
Skelex	Skelex 360°	S	2,2 kg	5 kg	Flexió de carbofibra	Mecanisme telescòpic
		M				
		L				
Ergosanté technologie	Hapo MS	Ajustable	1,3	6kg	Molles de gas.	Mecanisme telescòpic
Robotics lAb	VEX	S,M i L	2,8	2,2kg-3,8Nm	Mecanisme multi-vincle	-

				2,7kg- 4,7Nm		
				3,3kg- 5,7Nm		
				4kg-7,1Nm		
				5kg-6,6Nm		
Exhauss	Exhauss Reliver	Ajustable	7,9	25kg	Pistons de gas i molles	-
Eksi Bionics	Exso Evo	Ajustable	-	2,2kg – 6,8kg	Molles	-

Nota: Models en el mercat de EXO_{UL} passius i les seves característiques. En la columna de talles en el cas en què s'indica talla ajustable es fa referència al fet que presenten una talla única ajustable. *Font: [Elaboració pròpia]*

És destacable la presència de models de pes d'assistència regulables en la Taula 2.2. En vista d'aquest factor, es considera una propietat del model essencial per a la seva comercialització. Addicionalment, alguns dels models presenten diferents variacions de tallatge que permeten l'adaptació a àmplia diversitat demogràfica.

Es realitza una anàlisi de les característiques conegudes dels models en el -Annexos I-.

2.1.8. Avantatges i limitacions de les tecnologies actuals.

Segons la revisió realitzada per I.Halim et. Al l'any 2021 [13], es van recollir els requisits dels usuaris a l'hora d'utilitzar els EXO passius. Addicionalment, s'ha aproximat un rang dels requisits quantificables en base als articles anomenats en l'apartat d'Avantatges i limitacions de les tecnologies actuals. Aquests requisits s'observen a la Taula 2.3.

Taula 2.3*Requisits dels usuaris*

Requisits	Descripció	Rangs quantificables
Practicat	El model ha de ser lleuger per a facilitar la mobilitat, amb un disseny robust que permeti una fàcil manipulació en diversos entorns de treball.	Pes:<5kg
Formació i suport	La usabilitat ha de ser considerada clara i intuïtiva, reduint la necessitat de formació.	Temps de formació: <1 hora
Disseny i estètica	El disseny ha de ser compacte i estèticament agradable, compatible amb l'ús de roba laboral i causal sense sobreexposició.	Qualificació subjectiva.
Cost	Ha de tenir preu accessible tant per a petites empreses com per a usuaris individuals.	Cost:<2000€
Comoditat	L'ajust i el suport ha de ser còmode per l'usuari, sense causar irritacions o incomoditat.	Permetre l'ús diari en jornades entre 4 i 8 hores.
Durabilitat	Els materials i el model han de garantir una llarga vida útil.	Vida útil: >5 anys
Baix manteniment	El manteniment requerit ha de ser mínim amb intervencions simples.	Manteniment mensual: <1h Cost de manteniment: t<100€/anuals

Nota: Llistat dels requisits generals considerats amb el seu rang considerat com adequat.

Font: [Elaboració pròpia en base a [13]]

2.1.8.1. Avantatges

a) Impacte integral en la biomecànica i funció cardiovascular.

S'han analitzat cinc estudis sobre els EXO_{UL} enfocats en els efectes durant la realització tant de tasques isomètriques com repetitives. Aquests estudis s'han centrat en l'avaluació de l'activitat muscular, la comoditat percebuda i cost cardíac, entre d'altres. Aquesta revisió es troba en -l'Annex III-.

Taula 2.4

Efecte en l'activitat muscular

Músculs estudiats	Δ Contraccions voluntàries màximes (% Δ MVC)									
	[14]				[15]		[16]	[17]		
	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(i)	(ii)		(i)	(ii)	(iii)
Trapezius descendens (extremitat superior)	34,6	35,1	48,4	10,1	26,7	43,3	-	35,8	21,9	26,6
Medius deltoideus (extremitat superior)	48,2	49,7	62,9	68,4	4,6	9,7	-	34,1	20,3	17,6
Anterior deltoideus (extremitat superior)	34,8	43,9	65,6	54,3	-	-	46,2	42,7	32,9	17,0
Biceps brachii (extremitat superior)	-	-	-	-	8,2	7,2	-4,1	40,1	17,5	11,4
Triceps brachii (extremitat superior)	11,4	-2,8	12,1	16,9	3,8	9,2	-3,8	14,3	-8,8	15,1
Erector spinae (lumbar)	-1,0	0,2	-0,9	4,3	5,4	3,4		3,0	3,6	4,9
Latissium (lumbar)	-	-	-	-	-	-	12,9	6,8	1,0	2,3
Rectus femoris (extremitat inferior)	-	-	-	-	3,2	5,5	-	-	-	-

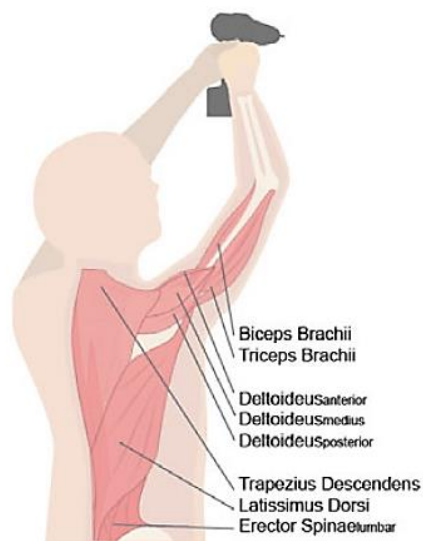
Biceps femoris (extremitat inferior)	-	-	-	-	6,2	3,5	-	-	-	-
Tibialis anterior (extremitat inferior)	-	-	-	-	2,5	3,0	-	-	-	-

Nota: Resultats trobats sobre la sol·licitació muscular amb el EXO_{UL} respecte a la sol·licitació muscular sense aquest $(MVR_{senseEXO} - MVR_{ambEXO})/MVR_{senseEXO} \cdot 100$. Els identificadors de i-iv mostren la quantitat d'estudis realitzat en cada revisió. Se selecciona en verd qualsevol percentatge igual o superior a 10 i en vermell els percentatges negatius.

Font: [Elaboració pròpia]

Fig. 2.2

Anatomia muscular del tronc superior



Nota: Anatomia muscular del deltoideus, bíceps brachii, tríceps brachii, trapezius descendents, latissium dorsi i erector spinae. Font: [17]

Els resultats obtinguts ofereixen una visió detallada de l'impacte dels EXOs. Tot i utilitzar diferents EXOs i tasques, en general, es mostra un impacte positiu en la disminució de la sol·licitació muscular. S'observa una major disminució de l'activitat muscular en els següents músculs:

- *Trapezius descendents* amb una disminució màxima del 48,4% al treballar amb un angle de 120°.

- *Deltoideus anterior* present una disminució màxima del 65,6% al treballar amb un angle de 120°.
- *Deltoideus medius* amb una reducció màxima del 68,4% a una posició estàtica de 150°.

Adicionalment, el *triceps brachii* mostra de manera general una disminució de l'activitat muscular, no obstant això, durant l'estudi realitzat amb eines elèctriques per sobre del cap (ii) [17] mostra una lleu sobrecàrrega muscular del 8,8%.

En la Taula 2.4 es mostra una reducció de la sol·licitació muscular més significant quan l'orientació del braç es troba a 120° respecte de l'eix vertical. En aquest punt s'observa una major reducció en quatre músculs a la vegada: *trapezius descendents*, *deltoideus anterior*, *deltoideus medius* i *Triceps brachii*. Així doncs, es considera que el punt òptim de treball de l'EXO_{UL} es troba a 120°. Corroborant les afirmacions realitzades per M.Satu et al. 2023 [14] i Y.-K. Kong et al. 2022 [15].

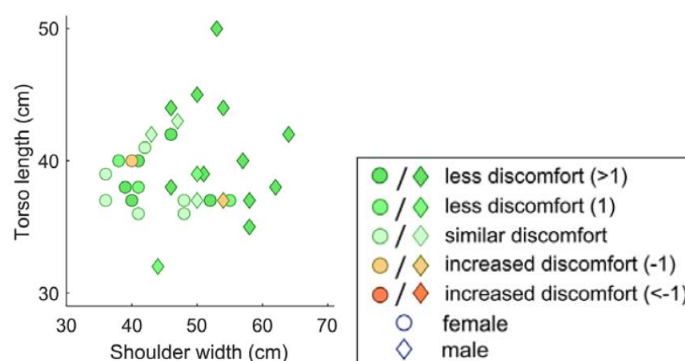
Comoditat percebuda

Els estudis [15] i [16], realitzats en referència al desconfort percebut no donen resultats satisfactoris. En el cas de Y.-K. Kong et al. (2022) [15], s'observa una lleu reducció de les molèsties en el coll. Ara bé, no es perceben afectes significatius en la resta de parts del cos.

Per altra banda, en l'estudi realitzat per B.Arnoix et al. (2023) [16], es tenen en compte la relació amb les dimensions del tors i les espatlles dels participants amb el desconfort percebut.

Fig. 2.3

Confort percebut en relació a mides antropomètriques i gènere



Nota: Relació entre l'amplada de les espatlles, la longitud del tors, el gènere i el confort percebut. Font: [16]

En la Fig. 2.3, s'observa que 21 dels 32 participants van experimentar menys desconfort en portar l'EXO_{UL}, on s'ha calculat una reducció mitjana del 57% del desconfort en l'espatlla en referència al desconfort sense l'EXO_{UL}. Només dos participants van experimentar un lleuger augment del desconfort. No obstant això, el DeltaSuit ofereix una gran adaptabilitat de gènere, no mostra relació directa entre dimensions l'usuari amb el desconfort percebut.

Es conclou que es requeriria un estudi durant un temps més prolongat per tal d'oferir resultats significatius. Els EXO_{UL} passius estan destinats a la reducció o eliminació dels TME, trastorns apareguts progressivament en el temps, així com el seu efecte no s'observa en un temps d'ús de 10 minuts.

Efecte en el cost cardíac

El cost cardíac es refereix a la càrrega addicional que pateix el cor durant una activitat física. Així doncs, és una mètrica efectiva per a avaluar la seguretat i l'eficàcia de les eines d'assistència econòmica com els EXO_{UL}. Es calcula com a el diferencial de la freqüència cardíaca en repòs i la freqüència cardíaca durant l'activitat física.

Taula 2.5

Efecte en el cost cardíac

Referència	Freqüència cardíaca		Diferencial (Sense EXO _{UL} - Amb EXO _{UL})
	Sense EXO _{UL} (ppm)	Amb EXO _{UL} (ppm)	
[18]	(i)	52,1 ± 5,4	-7,2 ± 8,2
	(ii)	49,3 ± 9,7	3,9 ± 9,7
	(iii)	66,6 ± 5,2	-0,4 ± 7,4
[14]	(i)	99 ± 3	6 ± 4
	(ii)	98 ± 3	4 ± 3
	(iii)	100 ± 4	6 ± 4
	(iv)	105 ± 5	9 ± 5

Nota: Resultats trobats sobre els efectes dels exoesquelets en el cost cardíac. *Font: [Elaboració pròpia]*

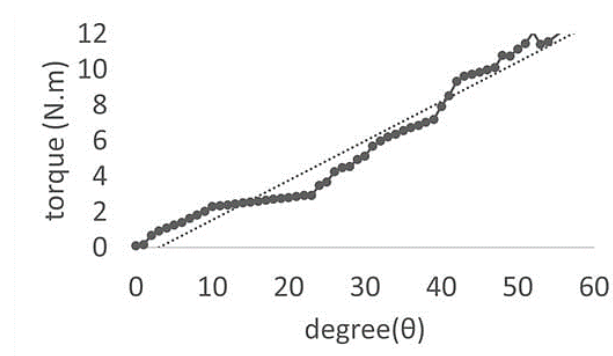
2.1.8.2. Limitacions i problemàtica.

a) No es presenta el parell màxim en el punt crític

Com bé esmenten diferents estudis com ve a ser l'avaluació realitzada per Wang.H et al.(2021) [19], el parell presentat pels exoesquelets passius que utilitzen elements elàstics, com molles, gomes elàstiques o molles de gas, mostren un comportament amb tendència lineal en relació amb la variació del grau d'inclinació del braç.

Fig. 2.4

Gràfica de la relació del parell d'assistència amb l'angle del braç



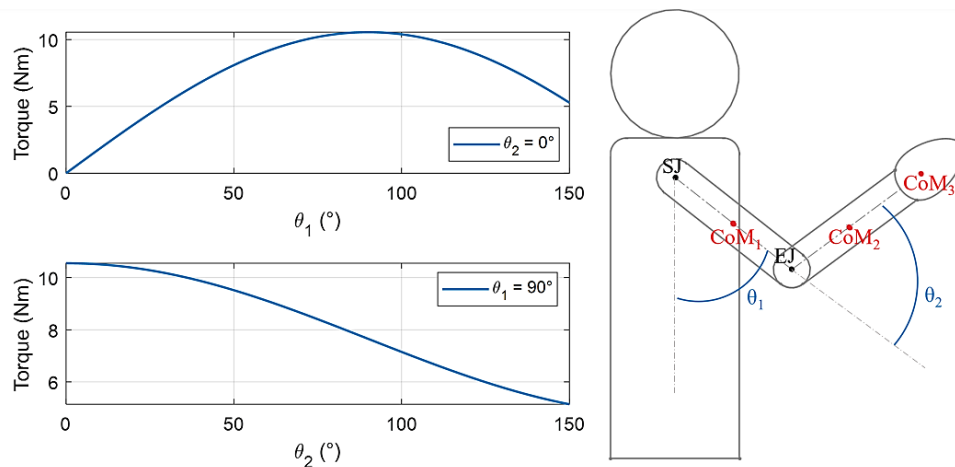
Nota: Gràfica il·lustrativa del parell mesurat proporcionat per l'EXO_{UL} en base a la posició del braç respecte a l'eix horitzontal. Utilitza un mecanisme de molla de gas o pistó de gas.

Font: [19]

El problema observat és que el parell màxim que pateix l'articulació de l'espatlla a causa de l'efecte de la gravetat en el pes de braç, es troba a una inclinació θ_1 aproximada de 90° i una inclinació de l'avantbraç θ_2 de 0° , com bé s'observa a la Taula 2.5

Fig. 2.5

Parell gravitacional produït a l'articulació glenohumeral.



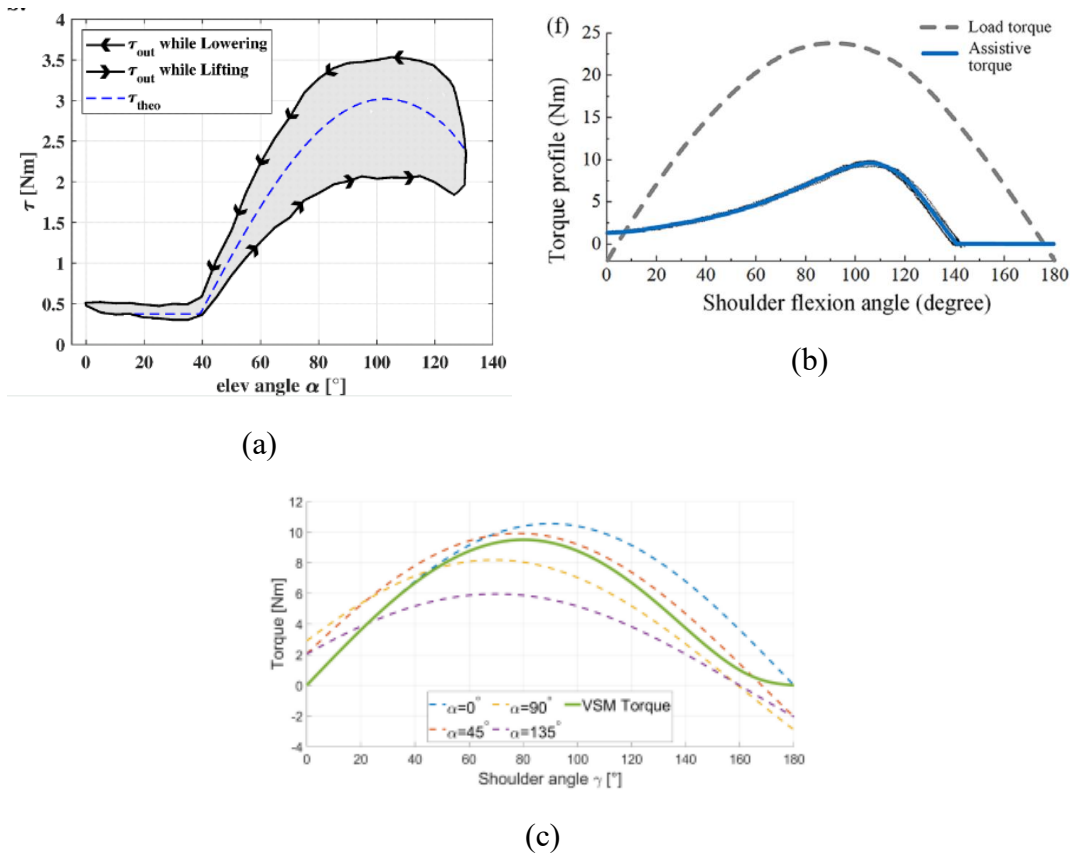
Parell degut a la gravetat respecte l'angle d'elevació del braç superior θ_1 i l'angle de flexió de l'avantbraç θ_2 . Font: [20]

Per tal de proporcionar un parell ideal, l'EXO_{UL} ha de transmetre un parell amb un comportament el més similar possible al parell presentat per les forces gravitacionals mostrades a la Fig 2.5.

S'han trobat diversos estudis i prototips que aborden aquesta problemàtica, com Exo4Work [21], la proposta realitzada per S.Ding et. al l'any 2022 [22] i la proposat de prototip de F.Balser et. al l'any 2022 [23]. Aquestes proposen solucions que intenten assolir amb aquest objectiu, no obstant, a la Fig 2.6, s'observa com els resultats obtinguts en el cas de Exo4Work i S.Ding, no assoleixen en la seva totalitat el resultat esperat. Per una altra banda, es pot considerar que els resultats obtinguts en la solució proporcionada per F.Balser et al. (c) s'aproxima al comportament desitjat. Tot i això s'observa com al llarg de l'informe de F.Balser et al. (2022) no contempla la variació angular del avantbraç durant el recorregut d'aquets.

Fig. 2.6

Gràfiques de compensació de el parell gravitacional



Nota: Gràfiques resultants el parell d'assistència comparat amb el parell gravitacional en funció de l'angle d'inclinació de l'espatlla. Font: (a) resultats de [21], (b) resultats de [22] i (c) resultats de [23].

No obstant, cap dels anteriors models tenen en compte la influència de la posició l'avantbraç en el parell produït en l'articulació. Aquest aspecte és habitual en models d'actuadors actius.

b) No apte per entorns hostils

Segons les opinions públiques a fòrums d'internet com, Reddit, diferents usuaris comenten la poca duració dels EXO en entorns hostils.

En el cas analitzat [24], esmenta que l'usuari va invertir en la compra de esl EOX-S de Hilti per a una entorn de soldadura i de tallat de fusta. En el cas de la soldadura, el EXO es va cremar entre 2 o 3 setmanes d'ús. En el cas de el tallat de fusta, el serrin va crear saturació i dificultats de moviments en el sistema de compensació d'energia.

c) Pes.

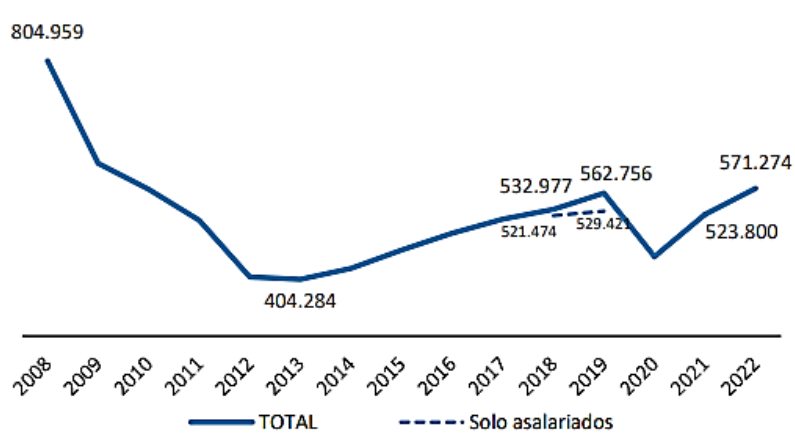
Algunes solucions disponibles en el mercat, com ve a ser EXHAUSS [25], presenten una alta càrrega del conjunt, dificultant el seu ús prolongat.

2.1.9. Justificació.

Segons l'informe d'estadística d'accidents laborals realitzat per la Subdirecció General d'Estadística i Anàlisi Sociolaboral de l'Estat [26], es van reportar un total de 571.273 accidents de treball en jornada amb conseqüències de baixa laboral l'any 2022.

Fig. 2.7

Estadística d'accidents de treball en jornada amb baixa laboral



Nota: Estadística d'accidents de treball en jornada amb baixa laboral des de l'any 2008 fins al 2022 a Espanya. Font: [26]

En la Fig. 2.7, es posa de manifest, que els sectors que tenen tendència a presentar uns valors més elevats d'accidents són, per diferència, la indústria manufacturera, seguida per al sector de la construcció i procedit per les activitats sanitàries.

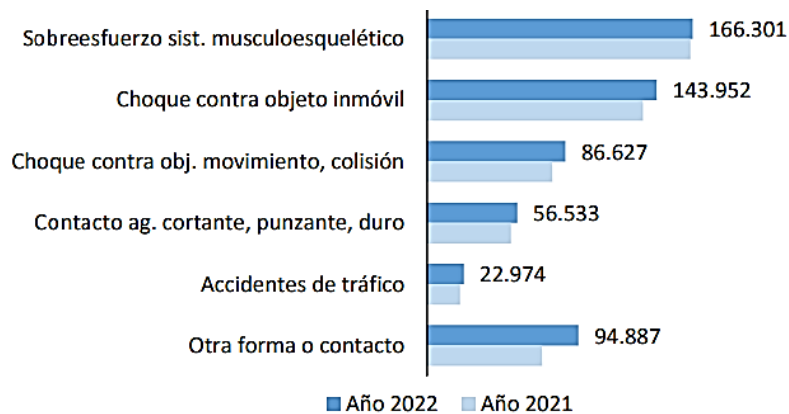
Fig. 2.8*Estadística d'accidents de treball per sector*

Nota: Estadística d'accidents de treball 2022 i 2021 en jornada amb baixa distribuït en seccions d'activitat econòmica a Espanya. *Font:* [26]

La Fig. 2.9, basada en les dades de l'estudi [26], demostra que l'accident laboral més comú a Espanya, durant els anys 2021 i 2022, és aquell causat per sobreexforç del sistema musculoesquelètic. Així doncs, segons un altre estudi realitzat per l'INSST [27], constata que el tipus de desviació més comú causat per sobreexforç en entorn laboral és el de baixar o transportat pes i aixecar-se, constant un 30,6% dels reports de lesions per sobreexforç. Addicionalment, menciona que els llocs més afectats, són l'esquena amb diferència i les espatlles en quart lloc.

Aquestes dades destaquen la urgència d'implementar solucions que puguin disminuir aquests valors i protegir la seguretat dels treballadors en aquests sectors claus de l'economia. És en aquest context, la creació d'exoesquelets industrials per evitar sobrecàrregues es revela com una iniciativa crítica per a la millora de la seguretat laboral i la reducció d'accidents.

Les principals activitats econòmiques beneficiades per aquesta tecnologia, són: la indústria manufacturera, la construcció i el transport i emmagatzematge, aquestes són les que presenten els majors desafiaments en termes de seguretat. Addicionalment, en aquests entorns, és habitual la realització de feines i aixecament de pes per sobre del cap, causant amb freqüència lesions d'espatlles o lumbar.

Fig. 2.9*Estadística d'accidents de treball per causa de lesions*

Nota: Estadístiques d'accidents de treball en jornada amb baixa per forma o contacte (any 2021 i 2022). *Font:* [26]

És a causa d'aquesta alta freqüència d'incidències en aquests sectors, que l'objectiu d'aquesta recerca no es limita únicament a reduir el nombre d'accidents per sobreesforç, sinó també a promoure l'ús de tecnologia destinada a millorar la salut i el benestar de les persones.

2.1.10. Normativa d'estandardització.

Per al disseny i implementació d'un exoesquelet és imprescindible seguir les normatives i estàndards establerts a escala nacional internacional.

La ASTM va formar l'any 2017 el comitè F48 per tal de regular i establir estàndards per a EXO passius i actius. La norma d'estandardització ASTM F3474-20 "Pràctica estàndard per establir paràmetres ergonòmics funcionals de l'exoesquelet i mètriques de prova [28]", estableix criteris clars per a l'avaluació d'ergonomia dels EXO. Dictamina que el procés de disseny s'ha de considerar paràmetres específics per tal d'assegurar la seguretat del producte de cara l'usuari.

Aquesta normativa està centrada en establir les mètriques d'avaluació de l'ergonomia realitzades en laboratoris o camps d'aplicació, no concreta la metodologia o mètriques necessàries per a la validació tècnica prèvia del model [28]. Aquesta metodologia aplica a la fase posterior a realitzar en un model físic en un entorn controlat, no un model teòric, com és el cas del present projecte.

2.2. Marc teòric.

2.2.1. Anàlisi de biomecànica.

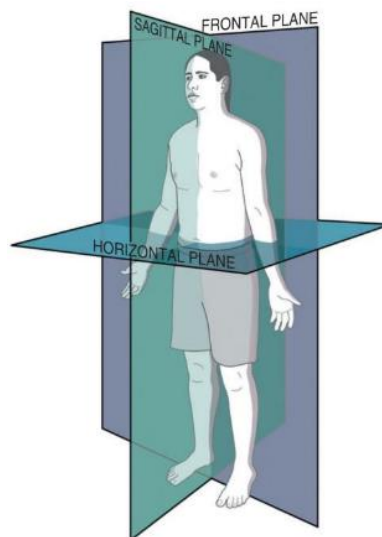
2.2.1.1. Plans de rotació.

Les articulacions giren en un pla perpendicular a un eix de rotació. Aquests plans poden ser: el pla sagital, divideix el cos en part dreta i esquerra; el pla frontal o coronal, divideix el cos en meitat frontal i posterior; i el pla horitzontal o transversal, divideix el cos en meitat superior i inferior.

Els plans, inicialment estàtics, varien d'orientació en el moment que es té en compte la moció del cos.

Fig. 2.10

Tres plans cardinals del cos



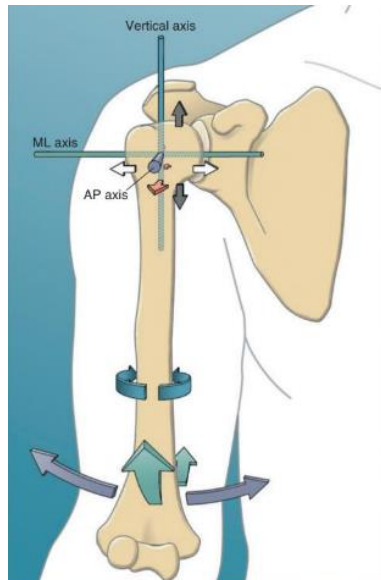
Nota: Els tres plans cardinals del cos. Pla frontal (*frontal plane*), Pla horitzontal (*horizontal plane*) i pla sagital (*sagittal plane*). Font: [29]

2.2.1.2. Graus de llibertat.

Els graus de llibertat (DoF), venen definits per Naumann, Donald A. (2016) [29] com el nombre de plans de moció angular en el que es pot moure una articulació. Una articulació pot tenir fins a tres DoF, corresponents als tres plans cardinals.

Fig. 2.11

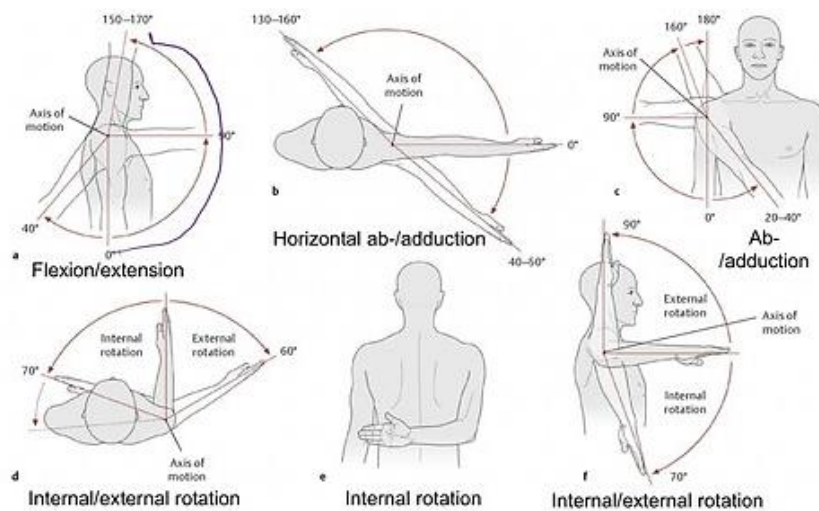
DoF en l'articulació glenohumeral



Nota: Il·lustració dels DoF presents en les articulacions de l'espatlla. *Font:* [29]

Fig. 2.12

Moviments naturals de l'articulació glenohumeral



Nota: Moviments de l'articulació de l'espatlla glenohumeral i els seus rangs de moviment.

Font: [30]

Taula 2.6*Rang de moviment de l'articulació glenohumeral*

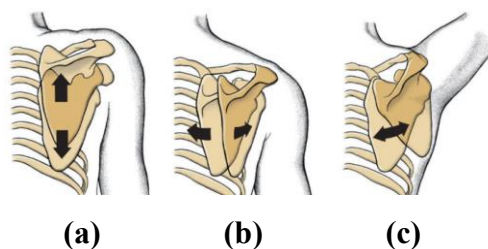
Moviment	Angles de moviment màxims
Flexió extensió	170°-40°
Abducció i adducció horitzontal	160°-50°
Abducció i adducció vertical	160°-40°
Rotació interna i externa	70°-60°

Nota: Rangs mitjans de moviment il·lustrats en la Fig. 2.12. Font: [elaboració pròpia en referència a [30]]

L'espatlla presenta rotació en tres eixos de rotació i els seus respectius plans de movió angular: flexió i extensió al voltant de l'eix lateral-medial (ML) (fletxes verdes observades en la Fig.11); abducció i adducció al voltant de l'eix anterior-posterior (AP) (Fig.11, fletxes morades); i rotació interna i externa al voltant de l'eix vertical (Fig 2.12 fletxes corbes blaves). Aquestes rotacions poden ser observades de manera clarificada a la Fig 2.12.

Totes les articulacions sinovials presenten translació, referides com moviments accessoris o joc de l'articulació. En el cas de l'articulació glenohumeral, articulació de l'espatlla, presenta translació anterior-posterior, media-lateral i superior-inferior (observada en les fletxes de la part superior de la Fig 2.12).

Les translacions produïdes en l'articulació glenohumeral es produeixen degut a la seva connexió la connexió de l'articulació esternoclavicular, és a dir, la clavícula.

Fig. 2.13*Moviments escapulars*

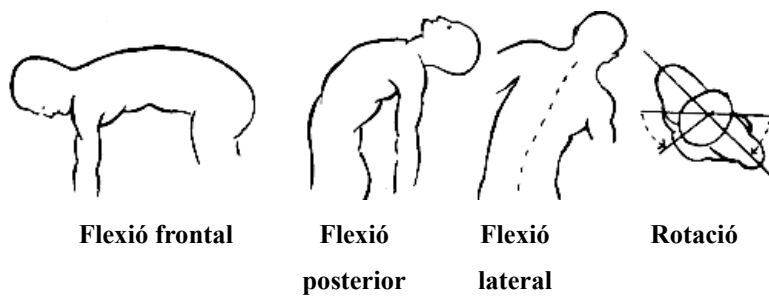
Nota: Disposició il·lustrativa de l'elevació i depressió (a), protracció/adducció i retracció/abducció (b) rotació cap avall i cap amunt (c) de les escàpules. Font: [29]

Taula 2.7*Rangs de moviment de l'articulació esternoclavicular*

Moviment	Angles de moviment mitjos
Elevació	0° - 30°
Depressió	0° - 5°
Protracció	0° - 15°
Retracció	0° - 15°
Rotació	0° - 50° (antihorari)

Nota: Rangs mitjans de moviment il·lustrats en la Fig. 2.13. Font: [elaboració pròpia en referència a [31]]

Si es té intenció de redistribuir l'energia a la zona lumbar i del maluc, és precís i indispensable tenir en consideració els moviments ocasionats a la columna o observats a la Fig. 2.14.

Fig. 2.14*Moció del a columna vertebral*

Nota: Il·lustració de les diferents postures i moviments que permet la columna. Font: [32]

Taula 2.8*Rangs de moviment de la columna vertebral*

Moviment	Angles de moviment mitjos
Flexió frontal	0° - 80°
Flexió posterior	0° - 25°
Flexió lateral	0° - 35°
Rotació	0° - 45°

Nota: Rangs mitjans de moviment il·lustrats en la Fig. 2.14 Font: [elaboració pròpia en referència a [33]]

2.2.2. Anàlisi d'antropometria.

Segons les dades recollides [34], a Europa, la mitja per a homes és de 178,25 cm d'alçada i un pes de 85,05 kg i d'igual manera per a dones resulta en una altura mitjana de 164,5 cm i un pes de 70,15 kg. Valors coincidents amb les des d'una distribució normal global mostrada en la Fig. 3.15.

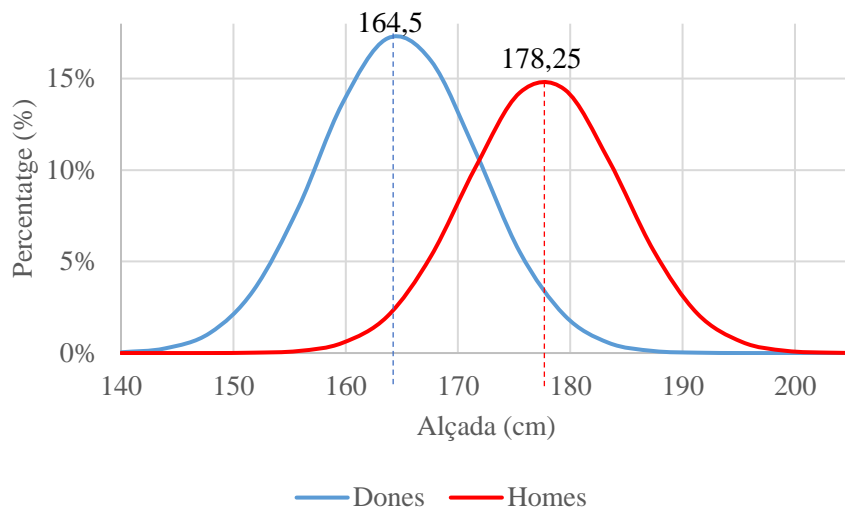
Taula 2.9*Mitja de pes i altura en Europa, homes i dones*

Europa	Homes		Dones	
	Altura (cm)	Pes (kg)	Altura (cm)	Pes (kg)
Europa de l'Oest	180	86,1	166	69,2
Europa del Sud	176	83,2	162	66,9
Europa del Nord	179	87,1	165	72,3
Europa de l'Est	178	83,80	165	72,2
Mitjana total	178,25	85,05	164,5	70,15

Nota: Taula demostrativa de les alçades i pesos mitjans dels homes i dones per secció a Europa. Categoritzat en Europa de l'Est, Sud, Nord i Oest. Font: [34]

Fig. 2.15

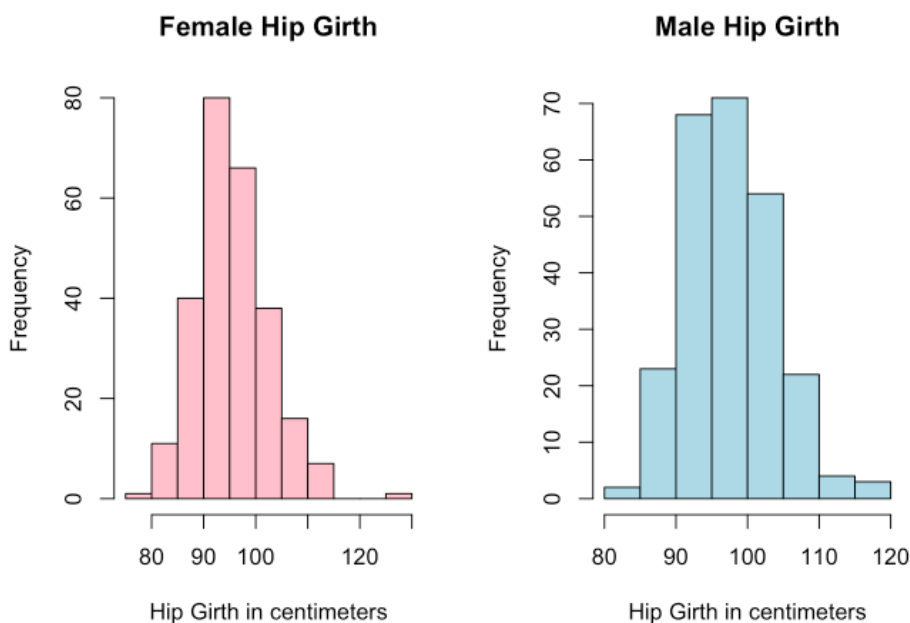
Gràfica de la distribució d'alçada de la població global



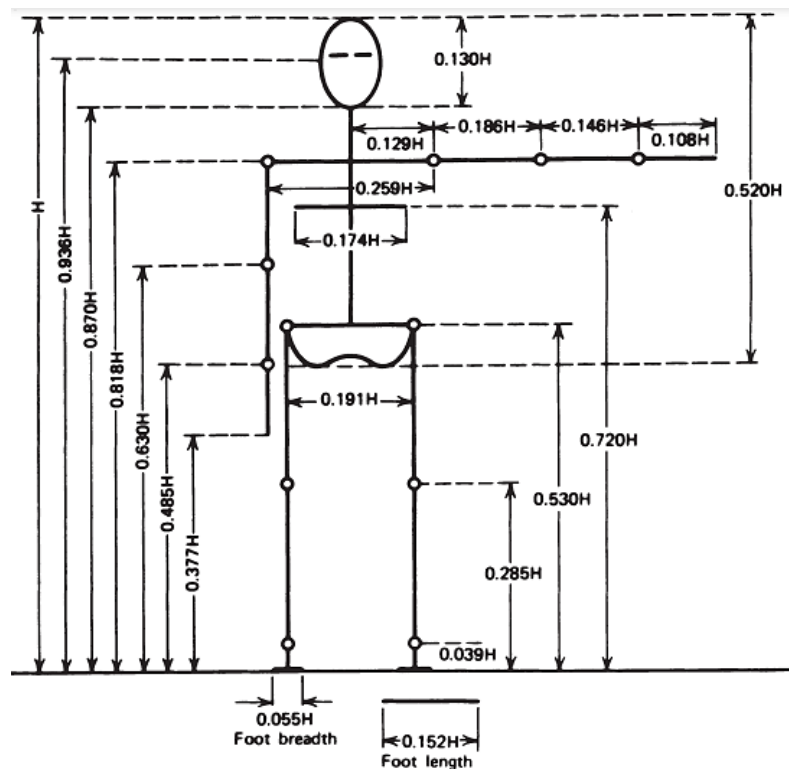
Nota: Gràfica demostrativa de percentatge de la població global (eix vertical) pertanyent als diferents rangs d'alçada estudiats en centímetres (eix horitzontal). Les dades recollides en homes es mostren de color vermell i les dades en dones en blau. Font:[Elaboració pròpia en referència a [35]]

Fig. 2.16

Circumferència mesurada en cm de dones i homes.



Font: Distribució normal recollida dels perímetres mesurats en cm de malucs. [37]

Fig. 2.17*Proporcions generals del cos humà.*

Nota: Longituds generals del cos humà expressades en fraccions respecte a l'alçada 'H' total. No es diferencien proporcions entre homes i dones, es consideren aproximadament les mateixes. *Font:* [36]

Per el disseny de l'arnès de suport es té en consideració la distribució normal de les mides dels malucs de 507 individus, 247 homes i 260 dones, informe recollit per Columb 2019 [37]

Segons l'informe de les mesures antropomètriques [36], les mesures generals per avaluar la mida i la forma del cos humà, mostrades la Fig.2.17. Aquests coeficients mostrats són àmpliament utilitzats en els sectors que impliquen una anàlisi antropomòrfica, com són la medicina o el disseny de roba. En tractar-se d'un coeficient mitjà, no es troba una diferenciació de proporcions antropomètriques entre dones i homes. Aquests valors es plantegen com a eina en el càlcul de les dimensions de l'arnès de suport i els ajustatges.

Taula 2.10*Dades antropomètriques generals del centre de gravetat i pes de les extremitats*

Segment	Descripció	Pes proporcional al pes del cos (%)	Centre de gravetat (%)
Mà	Eix del canell fins a l'articulació interfalàngica del tercer dígit	0,6%	50,6%
Avantbraç	Eix del colze fins a l'apòfisi estilades del cúbit	1,6%	43%
Braç superior	Eix glenohumeral fins a l'eix del colze	2,8%	43,6%
Avantbraç i mà	Eix del colze fins a l'articulació interfalàngica del tercer dígit	2,2%	68,2%
Braç total	Eix glenohumeral fins a l'articulació interfalàngica del tercer dígit	5%	53%

Nota: Taula amb les dades antropomètriques del centre de gravetat de els segments del cos.

Font: [29]

3. Objectius i especificacions tècniques.

L'objectiu principal del projecte és dissenyar un exoesquelet industrial passiu centrat en les necessitats ergonòmiques i de rendiment de l'exoesquelet. Assolint les següents especificacions tècniques:

- Desenvolupament d'un EXO passiu.
 - Pes del conjunt sense l'arnès inferior a 4kg.
 - Capacitat de compensar un pes mínim de 4kg.
 - El parell d'assistència ha de mostrar el mateix comportament que les forces gravitacionals amb un 10% d'error.
 - El model s'ha de poder regular amb una variació superior a 1 kg.
 - Permetre els graus de llibertat naturals observats en la Taula 3.1.
- Perspectiva de gènere:
 - S'ha de considerar les diferències anatòmiques i ergonòmiques entre gèneres, mitjançant un ajust personalitzat. El model ha de ser ajustable per a usuaris amb les següents mesures antropomètriques.
 - Longitud del braç superior entre 356mm i 391mm.
 - Longitud d'esquena entre 476mm i 714mm

Taula 3.1

Rangs de moviments naturals de l'espatlla, escàpula i esquena.

Moviments	Rang de moviment naturals
Moviment de l'espatlla	
Flexió i extensió	150°-40°
Abducció i adducció horitzontal	160°-50°
Abducció i adducció vertical	180°-40°
Rotació interna i externa	70°-60°
Moviment escapular	
Elevació	0° - 30°
Depressió	0° - 5°
Protracció	0° - 15°
Retracció	0° - 15°
Rotació	0° - 50° (antihorari)

Moviment de la columna	
Flexió frontal	0° - 80°
Flexió posterior	0° - 25°
Flexió lateral	0° - 35°
Rotació	0° - 45°

Nota: Rangs màxims normals del moviment humà considerats per a l'elaboració del disseny de l'exoesquelet. Font:[*Elaboració pròpia*]

4. Generació i plantejament de possibles solucions alternatives.

Amb l'objectiu de complir amb les especificacions tècniques requerides per aquest projecte, s'han explorat diverses alternatives de solucions, en referència a la configuració d'articulacions, els materials utilitzats i els actuadors passius.

S'ha seguit el mètode de BrainStorming i recerca basada en solucions extintents per a la identificació d'alternatives potencials. S'ha creat un marc per a la selecció de solucions, prioritzant aquelles que compleixen els criteris tècnics establerts i avantatges en usabilitat, eficàcia i sostenibilitat.

4.1. Solucions d'actuadors.

Les solucions proposades no s'han basat en les especificacions tècniques del projecte, sinó en l'acompliment de la funció d'assistir en l'aixecament dels braços. Per a la generació de solucions de mecanismes s'ha realitzat la metodologia del brainstorming. En aquesta generació d'idees no es té en compte si existeixen solucions iguals o semblants en el mercat.

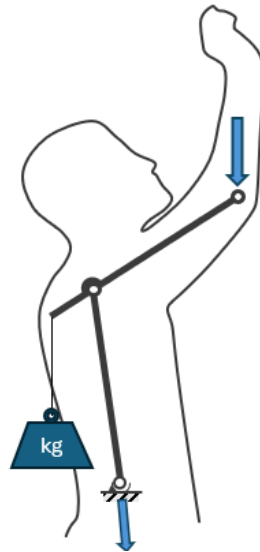
4.1.1. Contra pes.

El mecanisme es basa en la utilització d'un contrapès per a equilibrar la força gravitacional descendent exercida per la massa del braç, mitjançant un sistema de palanca transmet la força a l'articulació del marc de l'EXO creant així un parell contrari a l'exercida pel braç. La variació de la distància en el pla horitzontal del punt d'actuació fins al punt de fulcre presenta teòricament el mateix comportament que el parell a compensar.

La Fig 4.1 mostra el digrama simplificat del mecanisme per a l'elevació del braç.

Fig. 4.1

Diagrama simplificat de la proposta d'actuador per contrapès.



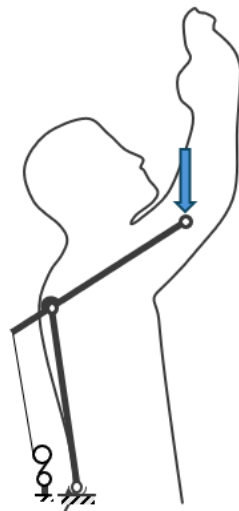
Nota: Diagrama simplificat del mecanisme de contra pes. Font: [Elaboració pròpia]

4.1.2. Molla de parell constant i variació de la distància al punt de fulcre.

Un sistema alternatiu és l'aplicació d'una força constant, mitjançant la integració de molles de força o parell constant. Aquests elements permeten l'aplicació d'una força constant en un element que permeti la variació de distància com ve a ser la distància en el pla horitzontal de la barra durant el rang de moviment del braç.

Fig. 4.2

Diagrama simplificat de la proposta d'actuador per molles de parell constant.



Nota: Diagrama simplificat del mecanisme de contra pes. Font: [Elaboració pròpia]

Les molles de parell o força constant, consisteixen en tires de gruix amb valor decimal, aquest gruix permet ser enroscades en si mateixes mantenint el diàmetre efectiu. La resistència a ser desenroscades mostra una força constant degut al diàmetre aproximadament constant de la molla.

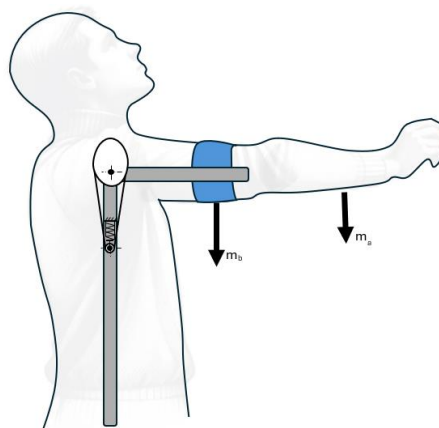
4.1.3. Molla helicoidal cilíndrica d'extensió o compressió amb politja de radi variable.

El mecanisme basat en una molla d'extensió o compressió per a l'assistència en l'aixecament del braç es presenta inicialment com una alternativa viable. Durant la fase de descens del braç, la molla actua resistint la inèrcia del moviment. Aquesta resistència resulta moderada a l'usuari degut al propi pes del braç. Addicionalment, proporciona un descens controlat i suau, evitant moviments bruscos o incontrolats que podrien causar lesions. En la fase d'ascens, la molla allibera l'energia acumulada, assistint així en l'aixecament del braç.

La variació del perfil de la força d'assistència de la present solució es valora mitjançant la variació del parell mitjançant la variació de la distància d'actuació mitjançant l'ús de politges de radi variable. Mecanisme observat en màquines de gimnàs Nautilus per a la variació de la força d'actuació davant d'un pes constant.

Fig. 4.3

Diagrama simplificat de la proposta d'actuador per l'actuador de molla helicoidal cilíndrica de compressió amb politja de radi variable.



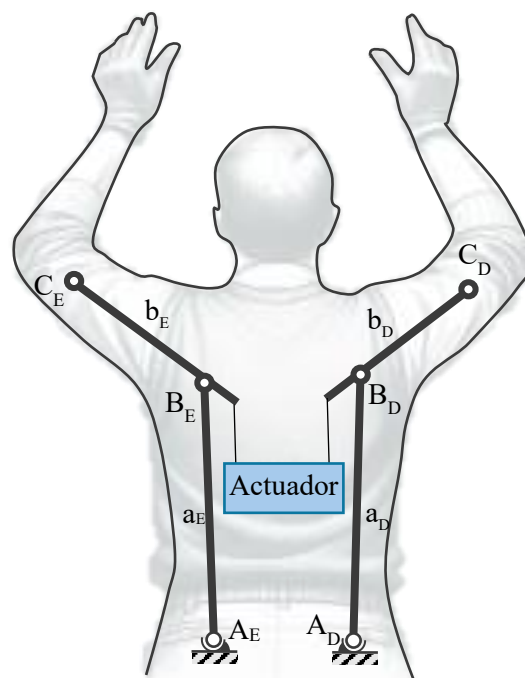
Nota: Diagrama simplificat del mecanisme d'actuació de molla helicoidal cilíndrica de compressió amb politja de radi variable. Font: [Elaboració pròpia]

4.2. Articulacions.

El següent plantejament de solucions per a les articulacions de l'exoesquelet ha sigut en base a l'objectiu de permetre la màxima llibertat de moviment a l'usuari, una bona transmissió del parell, estabilitat estructural i un marc estructural el menys rígid possible.

Fig. 4.4

Il·lustració dels components generals de l'estructura del model














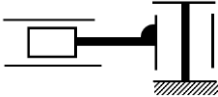


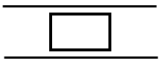
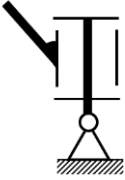


Nota: Nomenclatura identificadora de les articulacions A, B i C i identificació de les barres a i b. *Font: [Elaboració pròpia a partir de [38]]*

Les combinacions de les articulacions A, B i C són aplicades a un model de dues barres observat en la Fig. 4.4. Compost d'una barra *a* de suport i interconnexió entre el maluc i la barra *b* encarregada de la interconnexió amb l'actuator i el punt d'interfície amb l'usuari.

Seguint el disseny de dues barres esmentat es generen 6 alternatives de configuracions d'articulacions en la Taula 4.1.

Taula 4.1

Selecció de sis diferents combinacions d'articulacions

	Articulació de maluc A	Articulació d'espatlla B	Articulació de braç C
1	Ròtula esfèrica 	Rotativa en l'eix LM 	Rotativa en l'eix LM 
2	Ròtula esfèrica 	Rotativa en l'eix LM 	Fixació 
3	Ròtula esfèrica 	Ròtula esfèrica 	Rotativa en l'eix LM 
4	Fixació 	Ròtula esfèrica 	Articulació telescòpica i rotativa en l'eix LM 
5	Rotativa en l'eix vertical 	Rotativa en l'eix LM 	Mecanisme telescòpic en dos plans 
6	Rotativa en l'eix vertical i Rotativa en l'eix AP 	Rotativa en l'eix LM 	Fixació 

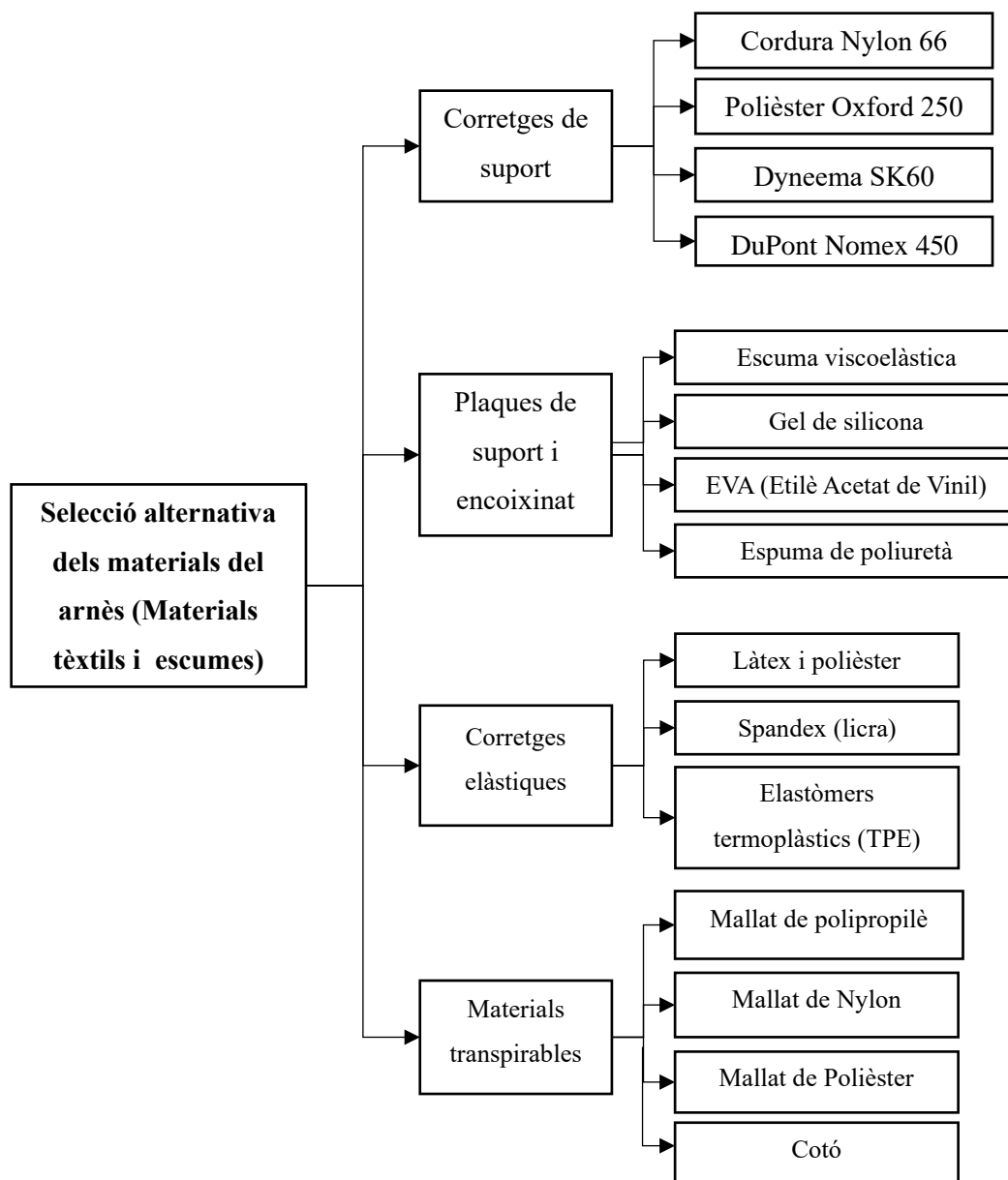
Nota: Selecció de sis diferents combinacions d'articulacions. La simbologia mostrada tenen la funció de representar i els elements i parells cinemàtics segons la UNE-EN ISO 3952. Font: [Elaboració pròpia]

4.3. Materials tèxtils i escumes.

Per a la realització del Brainstorming de les solucions tèxtils i escumes, s'ha consultat fonts com Rigid Lifelines [39] i la marca de motxilles Osprey [40], on es presenten nous materials emergents aplicables a arnesos de treball i motxilles de muntanya.

Fig. 4.5

Diagrama de les possibles alternatives de materials tèxtils i escumes



Nota: Presentació de alternatives de materials per tèxtils i plàstics per a l'arnès del EXOUL.

Font: [Elaboració pròpia]

4.4. Materials estructurals.

Per a la selecció dels materials de suport de l'estructura es busca trobar una varietat de materials que presentin els següents criteris: bona resistència mecànica i baix pes. Les següents propostes estan basades en la documentació proporcionada l'assignatura d'Enginyeria de Materials [41]. No es contemplen els materials de protecció del mecanisme.

Materials de les barres estructurals

- Aliatges d'alumini:
 - Alumini 7075
 - Alumini 7068
- Acer AISI 4130
- Fibra de carboni amb resina epòxid.

5. Selecció de l'alternativa més adequada.

Per a l'avaluació de des diferents alternatives es tenen com a referència les especificacions tècniques requerides amb anterioritat. Es considera que la solució més adequada és aquella que compleix millor els objectius o el major nombre d'elles.

Per a la selecció de les alternatives es presenta una avaluació multi criteri amb l'objectiu de seleccionar la solució més òptima.

Aquesta avaluació consisteix en l'assignació de pesos per a cada criteri suggerit, per tal de donar més o menys preferència a diferents factors. Seguidament mitjançant la formulació observada en -Annex V-, es normalitza els valors de cada subjecte d'estudi en un rang de 0 a 1, on 0 és el pitjor valor i 1 el millor.

5.1. Selecció de l'actuador passiu.

Per a l'elecció del actuador passiu del EXO es precisa d'una anàlisi utilitzant estudis publicats, solucions en el mercat o anàlisi crítica. Per a l'elecció de la solució més viable es tenen en compte les especificacions tècniques esmentades amb anterioritat. Fan referència a l'actuador les següents:

- Actuador completament passiu, sense components elèctriques.
- Parell mínim de 2Nm.
- Pes total del disseny inferior a 4kg.
- Ha de permetre la regulació del parell.
- El parell assistit per l'activador ha de mostrar un comportament similar al parell provocat per les forces gravitacionals.

5.1.1. Opció més viable.

Mecanisme de parell constant i variació de la distància al punt de fulcre

Aquest mecanisme presenta unes característiques similars a la solució del contra pes, s'aplica una força constant en una barra paral·lela al braç. A diferència del contra pes, aquesta solució permet la transmissió de càrregues sense suposar un pes addicional l'usuari ni unes grans dimensions. Empreses com Vulcan Design [44] presenten un àmplia selecció de molles

de parell i força constant. En el seu catàleg ofereixen molles de parell constant amb valors compresos entre 0,003-18,08N·m. Les molles de força constant queden descartades com a solució per a la necessitat de recorregut i linealitat de tracció de la molla que precisen.

Es calculen les característiques i càrregues del model amb una molla de parell constant mínim de 0,003N·m i una de 18,08N·m per la compensació gravitacional de 8N·m.

$$\tau = \frac{\tau_{molla}}{d_p} \cdot x \quad (5.1)$$

- τ és el parell en N·m.
- r_p radi de la segona gola del tambor de transmissió del parell (m)
- x la distància entre el punt de fulcre i el punt d'aplicació de la força. (m)

Molla de parell 0,003N·m

$$8 \text{ N} \cdot \text{m} = \frac{0,003 \text{ N} \cdot \text{m}}{d_p} \cdot x \quad (5.1)$$

$$\frac{8 \text{ N} \cdot \text{m}}{0,003 \text{ N} \cdot \text{m}} = \frac{x}{r_p} \rightarrow 2666,6 = \frac{x}{r_p}$$

La relació entre la distància d'aplicació i el radi de la segona gola del tambor de transmissió del parell mostren una relació de 2666,6. Per un radi de gola equivalent a 0,010m el valor de x és de 26,6m. El valor obtingut és considerat no viable degut a la transmissió insuficient de parell.

Molla de parell 18,08N·m

$$8 \text{ N} \cdot \text{m} = \frac{18,08 \text{ N} \cdot \text{m}}{d_p} \cdot x \quad (5.1)$$

$$\frac{8 \text{ N} \cdot \text{m}}{18,08 \text{ N} \cdot \text{m}} = \frac{x}{r_p} \rightarrow 0,44 = \frac{x}{r_p}$$

L'avantatge mecànic que determina la relació entre les longituds mostra un valor inferior a 1 en comparació amb el cas estudiat de la molla de parell 0,003N·m. Per un radi de gola

equivalent a 0,010m el valor de x és de 0,004m. La molla de parell 18,08N·m ofereix una compensació òptima del parell sense comprometre l'estabilitat i massa del conjunt.

Durant la rotació del braç, la longitud en l'eix horitzontal de la barra tindrà un valor màxim a 0° respecte a l'horitzontal i un mínim en 90° i -90°, garantint la compensació màxima en el punt crític de compensació (0°) i amb un valor 0 a 90°.

Es mostra la viabilitat tècnica de la solució per a l'assoliment dels objectius proposat en el projecte.

5.1.2. Opcions descartades.

Contra pes

Tot i assistir en l'aixecament del braços i poder ser regulable afegint o retirant pes, no es considera una solució viable. Una de les problemàtiques presentades és el pes que representa en relació al pes total del disseny. El pes màxim establert en els objectius i especificacions tècniques és equivalent a 4kg, donant per fet la simetria del model, un mecanisme individual pot assolir un valor màxim de 2kg, ignorant el pes dels demés components.

Es procedeix a calcular la distància entre el punt pivot i el punt d'aplicació de la massa de compensació per a compensar un parell de 8N·m.

$$\tau = m \cdot g \cdot x \quad (5.1)$$

- τ és el parell en N·m.
- m és la massa del contrapès en kg.
- g l'acceleració de la gravetat en m/s^2 .
- x la distància entre el punt de fulcre i el punt d'aplicació de la força en m.

$$8Nm = 2kg \cdot 9,81 m/s^2 \cdot x \quad (5.1)$$

$$x = 0.408m$$

Per tal de proporcionar un parell de 8Nm s'hauria de disposar d'una articulació de 0,408m. Per motius estructurals i poc ergonòmics es descarta aquesta idea.

Molla helicoidal cilíndrica d'extensió o compressió

Per a l'anàlisi de viabilitat tècnica de la solució es basa en la llei de Hooke, aquesta indica que la tensió de la molla és directament proporcional a la deformació.

$$F = -k \cdot x \quad (5.2)$$

- k Constant de la molla.
- x Variació de la longitud de la molla des de l'estat de repòs.
- F Força elàstica de la molla.

Conformement amb (5.2), la deformació elàstica mostra el comportament lineal. Una de les principals limitacions dels exoesquelets actuals en el mercat és la seva incapacitat per compensar adequadament el parell (moment de força) generat a l'espatlla degut a les forces gravitacionals. Per a superar aquest desafiament, s'ha teoritzat que la implementació d'un mecanisme compost per una molla i una politja no circular es presenta com una solució inicialment viable. Aquesta combinació permet generar una força variable y adaptativa en l'articulació, crucial per a un moviment més natural i ergonòmic.

A diferència de les politges circulars tradicionals, una politja no circular pot variar la relació mecànica al llarg del moviment del braç. Això significa que el sistema pot ajustar dinàmicament l'assistència proporcionada basant-se en la posició angular del braç. Per exemple, quan el braç estigui a una inclinació de l'angle θ_1 de 90° (Fig 2.5) pot oferir major assistència, i a mesura que el braç augmenta o redueix l'angle θ_1 , disminueix progressivament sense guardar una relació proporcional.

Disseny de la politja no circular

$$r_\theta = r_{mitg} + A \cdot \sin(\theta) \quad (5.3)$$

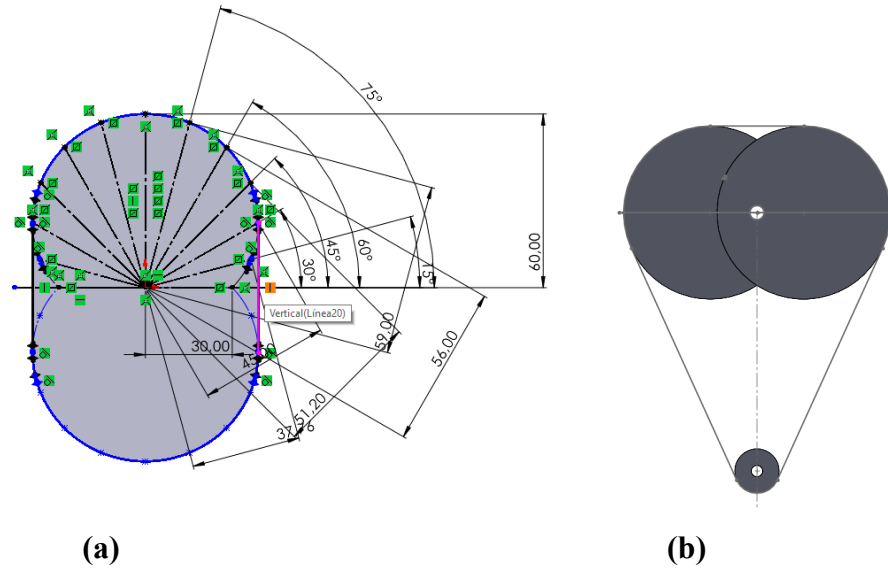
$$\tau_\theta = r_\theta \cdot k \cdot x(\theta)$$

- r_{mitg} Radi mig de la politja.
- A Amplitud de la variació del radi.
- θ Angle de rotació.

Iteració del radi.

Fig. 5.1

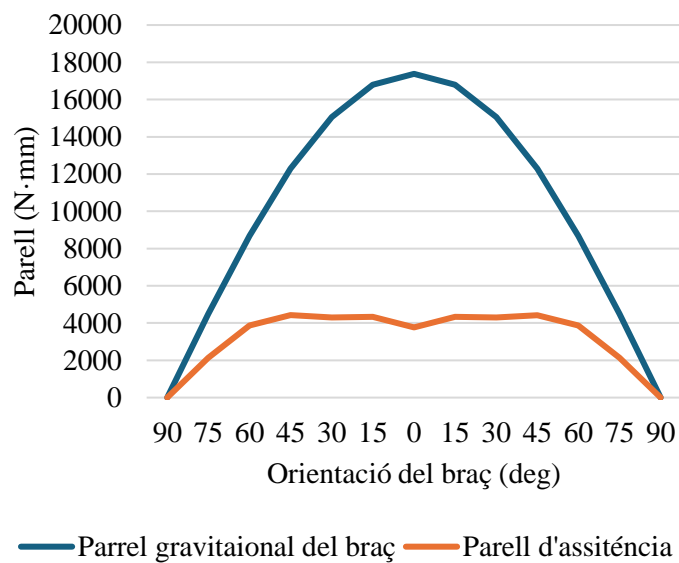
Iteracions del radi de la politja



Nota: (a) Iteració més aproximada del perfil desitjat (b) Simulació del desplaçament de la molla. Font: [Elaboració pròpia]

Fig. 5.2

Parell de compensació gravitacional de la solució molla helicoidal cilíndrica d'extensió o compressió en vers al parell gravitacional del braç



Nota: Perfil del parell gravitacional en vers al perfil d'assistència assolit amb el disseny de molla helicoidal amb politja no radia. Font:[Elaboració pròpia]

La inestabilitat en la compensació de la molla, atribuïda a la variació del radi de la politja, produeix valors que no s'alineen amb els requisits de comportament del parell torçor esperat. Condicions causades per la incapacitat de trobar una variació radial capaç de proporcionar una modulació adequada tant en el radi d'acció com en la tensió de la molla. Aquesta limitació crucial ha portat a la conclusió de que la implementació d'un radi variable en el present context és tècnica i funcionalment inviable.

5.2. Selecció d'articulacions.

Les espatlles són una de les articulacions més complexes del cos, presentant un rang de moviment molt ampli. Les sis solucions proposades venen mostrades en la Taula 4.1

Combinació 1:

- Maluc amb articulació esfèrica
- Braç superior i espatlla amb articulació rotativa en l'eix LM.

Proporciona un bon equilibri entre mobilitat i simplicitat. L'articulació esfèrica al maluc i la rotativa a l'espatlla proporciona els 3 DoF i les tres translacions produïdes en aquesta articulació. També permet els moviments flexió frontal, flexió lateral i rotació de la columna en un rang limitat. Addicionalment, l'articulació rotativa ubicada al braç superior proporciona una ajuda de la linealitat en el cas que el marc no s'ajusti completament.

- Combinació 2:
 - Maluc amb articulació esfèrica
 - Espatlla amb articulació rotativa en l'eix LM.
 - Braç superior amb fixació.

Igual que en el cas anterior, es presenta com una opció viable. En aquest cas es presenta com una opció més estable, conseqüentment és més viable transmetre el parell motor. Tot i ser més estable, no permet la translació vertical de les espatlles. No obstant això, es podria incorporar un regulador d'alçada per poder adaptar-se a diferents mides o una junta telescòpica en l'articulació del maluc. Permetent així tots els moviments permesos en les espatlles i en l'esquena.

- Combinació 3:
 - Maluc amb articulació esfèrica
 - Espatlla amb articulació esfèrica.

- Braç superior amb fixació.

Aquesta combinació presenta un alt grau de llibertat en els seus moviments. Aquest nivell de llibertat, tot i complir amb els requisits de versatilitat i llibertat de moviment, també involucra un desafiament a l'hora d'aplicar el par motor. Aquest desafiament requereix un disseny complex i possiblement no tan eficaç durant la transmissió de forces. És per aquest motiu que no es planteja com a possible solució.

- Combinació 4:
 - Maluc amb articulació fixa.
 - Espatlla amb articulació esfèrica.
 - Braç superior articulació telescòpica i rotativa en l'eix LM

La combinació 4 es presenta com una opció viable. No obstant la fixació de l'articulació del maluc pot restringir les flexions i rotacions produïdes en l'esquena, limitant així la comoditat i el moviment de l'usuari. És per aquest motiu que no es planteja com una possible solució.

- Combinació 5:
 - Maluc amb articulació rotativa en l'eix vertical.
 - Espatlla amb articulació rotativa en l'eix LM.
 - Braç amb mecanisme telescòpic en dos plans.

Aquesta solució, a diferència de l'anterior, permet la rotació de l'espatlla, així com les tres rotacions i translacions de l'espatlla. En contraposició no permet les flexions en el pla frontal de l'esquena, limitant molt la comoditat de l'usuari. En conseqüència, no es planteja com a solució alternativa.

- Combinació 6:
 - Maluc amb doble articulació en l'eix vertical i Rotativa en l'eix AP
 - Espatlla amb articulació rotativa en l'eix LM.
 - Braç amb articulació fixa.

Un cop analitzades les cinc alternatives, es conclou que les combinacions d'articulacions que millor s'adapten al moviment humà i permeten una millor transmissió de forces són, la combinació 1, 2 i 6. Tanmateix, la combinació 1 com la 2 presenten dues solucions molt similars respecte a una varietat d'exoesquelets presents en el mercat, com ve a ser la solució de Ottobock, Hilti o prototips d'estudi com l'observat en l'article redactat per Öçal et

al.(2023) [43]. Es presenten com una solució tècnicament viable, respecten l'ergonomia, són rígides i aporten una gran estabilitat en el disseny.

Per altra banda, la combinació 6 , molt diferencial a la resta de combinacions, s'utilitza en la solució del mercat Ekso Evo [3]. Aquesta solució segons la revista Exoskelton Report [44] és una dels models amb millor valoració dels usuaris.

En base a aquestes dues observacions, es considera la combinació 2 com la solució més adequada, degut al seu equilibri entre funcionalitat i simplicitat del model. Es considera una de les configuracions més habituals en els models comercialitzats, garantint la seva funcionalitat i adaptabilitat a l'usuari.

5.3. Selecció de materials tèxtils i escumes.

5.3.1. Corretges de suport

Fig. 5.3

Mètode ponderat normalitzat de la selecció multicriteri del material per a les corretges o cingles de l'arnès.

Criteri	Pes	500D Cordura Nylon 66	Polièster 1800D Oxford 250	Dyneema SK60	DuPont Nomex 450
Resistència a la tracció	0,41	0,88	0,00	1,00	0,86
Tenacitat	0,10	0,86	0,50	0,00	1,00
Resistència l'esquinçament	0,20	1,00	1,00	1,00	0,00
Resistència a l'abradió	0,14	1,00	0,00	0,00	0,50
Densitat (g/cm³)	0,08	0,52	1,00	0,00	1,25

Temperatura de fusió o descomposició	0,07	1,00	0,74	0,37	0,00
Total:		0,90	0,39	0,64	0,62

Nota: Mètode ponderat normalitzat de la selecció multicriteri del material per a les cingles de l'arnès segons diferents criteris amb els seus respectius pesos. El valor més proper a 0 es considera el material més apte per als criteris establerts. Els valors base de la normalització es troben adjuntats en -Annex V-.

El material resultant, teixit de polièster Oxford, presenta una alta resistència a l'abradió, propietats adients per a la seva implantació en l'arnès de suport. Aquest tèxtil permet el recobriments amb PVC per a permetre la seva impermeabilització o amb PE ignífug CPAi-84 impermeabilitzant i donant propietats ignífugues al material.

5.3.2. Plaques de suport i encoixinat.

La funció de les plaques de suport i encoixinat consisteix en la repartició uniforme de les forces de reacció i ampliació entre l'usuari i model.

Fig. 5.4

Mètode ponderat normalitzat de la selecció multicriteri del material per a les plaques de suport i encoixinat.

Criteri	Pes	Escuma viscoelàstica	Gel de silicona	EVA	Escuma de poliuretà
Comoditat	0,27	0,50	0,00	0,75	1,00
Durabilitat	0,19	0,67	1,00	0,00	0,33
Absorció d'impactes	0,54	0,25	0,00	1,00	0,50
Total:		0,39	0,28	0,75	0,61

Nota: Mètode ponderat normalitzat de la selecció multicriteri del material per a les cingles de l'arnès segons diferents criteris amb els seus respectius pesos. El valor més proper a 0 es

considera el material més apte per als criteris establerts. Els valors mostrats es consideren subjectius en base a les comparatives de les següents fonts [45] i [46]. Font:[*Elaboració pròpia*]

Les puntuacions normalitzades obtingudes indiquen el gel de silicona com a material més adequat per al encoixinat del arnés de l'exoesquelet. Aquest pot ser aplicat conjuntament amb escuma viscoelàstica per a zones de menys sol·licitació.

5.3.3. Materials transpirables.

Per a la avaluació multicriteri s'ha basat la selecció dels materials en aplicacions on es clau la transpirabilitat, com aplicacions esportives o d'equips de protecció.

Fig. 5.5

Mètode ponderat normalitzat de la selecció multicriteri del material per a les plaques de suport i encoixinat.

Criteri	Pes	Polipropilè	Nylon	Polièster	Cotó
Transpirabilitat	0,55	0,00	1,00	0,50	0,33
Confort	0,27	0,57	0,71	0,00	1,00
Resistència a l'abrasió	0,18	0,57	0,00	0,14	1,00
Total:		0,26	0,74	0,30	0,64

Nota: Mètode ponderat normalitzat de la selecció multicriteri del material per a les cingles de l'arnès segons diferents criteris amb els seus respectius pesos. El valor més proper a 0 es considera el material més apte per als criteris establerts.

5.4. Selecció dels materials estructurals.

Materials de les barres estructurals

Fig. 5.6

Mètode ponderat normalitzat de la selecció multicriteri del material per a les corretges o cingles de l'arnès.

Criteri	Pes	Alumini AW7075	Acer AISI 4130	Fibra de carboni T7000-12K
Mòdul elàstic	0,41	1,00	0,16	0,00
Resistència a la tracció	0,20	1,00	0,84	0,00
Límit elàstic	0,14	1,00	0,95	0,00
Densitat	0,10	0,17	1,00	0,00
Resistència a la fatiga	0,08	1,00	0,75	0,00
Corrosió	0,07	1,00	1,00	0,00
Total:		0,91	0,60	0,00

Nota: Mètode ponderat normalitzat de la selecció multicriteri del material per a les bigues estructurals valorades seguint diferents criteris amb els seus respectius pesos de prioritat. El valor més proper a 0 es considera el material més apte per als criteris establerts. Els valors base de la normalització es troben adjuntats en -Annex V-.Font:[*Elaboració pròpia*]

Els resultats obtinguts mostren el material de carbofibra amb resina epòxid T7000 destaca com el material més idoni per a les barres estructurals de l'exoesquelet. Aquesta elecció es basa en el seu alt rendiment en la majoria dels criteris avaluats. El seu baix pes específic contribueix a la seva selecció, optimitzant la relació entre la resistència mecànica i el pes total de l'exoesquelet.

Materials per l'equip de bloqueig telescòpic

La selecció del material PA6 pels elements de bloqueig es basa en els materials trobats en canyes de pescar distribuïdes per empreses com Cner Advanced Materials C i testire instruments Co i puntals oferts per l'empresa Vallés. Els models existents mostren un alt rendiment i funcionalitat del material. En base a les seves àmplies aplicacions durant altes sol·licitacions es mostra com una solució viable.

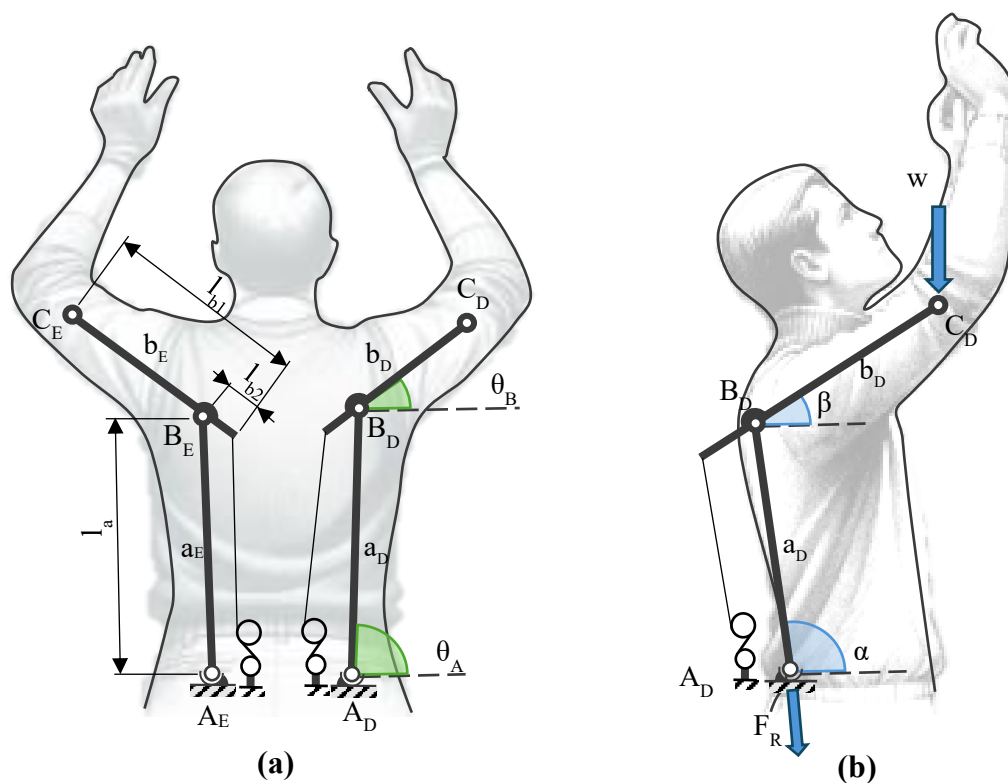
6. Desenvolupament del disseny.

6.1. Disseny conceptual.

El funcionament del mecanisme consisteix en la compensació de pes dels membres superiors a través d'un sistema de palanca. El sistema es pot observar en la Fig. 6.1, on s'interpreta el seu procés operatiu produït per la força gravitacional w del braç. Aquesta força actua en la barra b creant un moment de torsió al voltant del punt de fulcre produït en l'articulació B . A l'extrem oposat de la barra b , a una longitud l'_b respecte al punt de fulcre, es troba el sistema d'emmagatzematge d'energia elàstica (EES). El mecanisme està compost per una o dues molles de torsió constant.

Fig. 6.1

Diagrama del EXOumerus

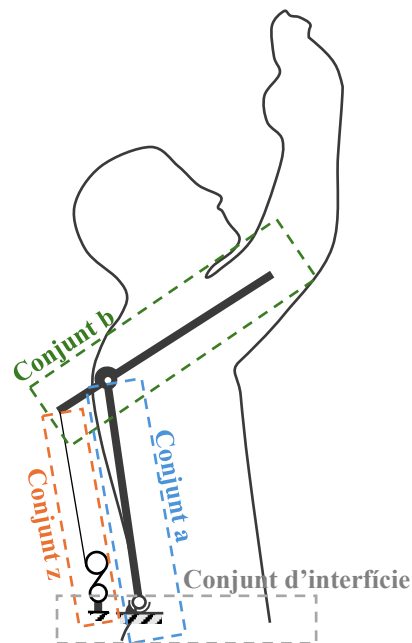


Nota: Diagrames de punts d'articulació, segments, actuator i nomenclatures dimensionals. En el diagrama (a) es mostra la vista del pla frontal posterior i els seus angles β_A , β_B i β_C i el (b) mostra la vista del pla sagital amb els seus respectius angles θ_A , θ_B i θ_C així com el vector de força d'entrada w i la força de sortida F_R . Font:[Elaboració pròpia a partir de [38]]

El sistema de molles es troba subjectat en la faixa lumbar, interconnectat mitjançant un cable l'extrem de b . La variació angular del braç es transmet a la barra b i permeten la redistribució del parell resultant en un comportament similar al perfil d'assistència per a contrarestar els efectes de la càrrega gravitacional en funció de l'angle d'elevació del braç.

Fig. 6.2

Divisió en conjunts del model EXOumerus.



Nota: Divisió de l'assemblatge en *conjunt b*, *a*, *z* i el *conjunt d'interfície* entre el *conjunt z* i *a* amb l'arnès. Font: [Elaboració pròpia]

Finalitat.

Es busca oferir una solució que permeti la compensació gravitacional del braç sense components electrònics que permeti una compensació parcial o total del braç. El perfil de parell d'assistència es vol dissenyar per compensar el parell gravitacional. El parell d'abstinència es pretén que mostri una variació depenent de la posició angular de les dos components del braç: braç superior i avantbraç més la mà.

La solució del model EXOumerus pretén permetre el rangs de moviment naturals del cos.

Es busca assolir aquestes finalitats amb un model que no comporti una càrrega molesta per a l'usuari.

6.2. Càlculs i disseny.

En aquests apartats es mostren els càlculs confeccionats per al disseny i anàlisi del projecte en unitats del sistema internacional.

Coefficients antropomètrics:

- Longitud del braç: 0,186_(h)
 - Centre de gravetat: 0,436 (Longitud del braç)
- Longitud de l'avantbraç i mà: (0,146 + 0,108)_(h)
 - Centre de gravetat: 0,682 (Longitud de l'avantbraç i mà)
- Longitud de l'esquena: 0,34_(h)
- Pes del braç: 0,028_(p)
- Pes de l'avantbraç: 0,022_(p)

6.2.1. Càlcul del parell generat en l'articulació glenohumeral.

Un dels principals objectius del projecte és proporcionar un parell similar o igual al parell o moment presentat per les forces gravitacionals del braç.

Per al càlcul del parell es formula el moment resultant creat en el braç com a sumatori dels moments causats pels diferents segments del braç: mà, avantbraç i braç superior. Sumatori observat en (6.1).

$$\tau_{espatlla} = \sum m \cdot g \cdot x_{cdg} \cdot \cos(\theta) \quad (7.1)$$

- $\tau_{espatlla}$ es considera el moment o parell produït en l'espatlla en Newtons-metre (N·m)
- p Pes de l'usuari (kg).
- m_b Massa del braç (kg).
- g Acceleració de la gravetat equivalent a 9,81 (m/s²).
- x_{cdg} Distància del centre de gravetat des de l'articulació glenohumeral (mm).
- θ Angle d'inclinació d'un component en referència a l'eix horitzontal (deg).

Per a la realització d'una anàlisi quantitativa dels moments generats en l'articulació glenohumeral, es presenten dues situacions clau. Mitjançant la representació gràfica realitzada amb MatLab i GeoGebra, es busca estudiar les següents situacions:

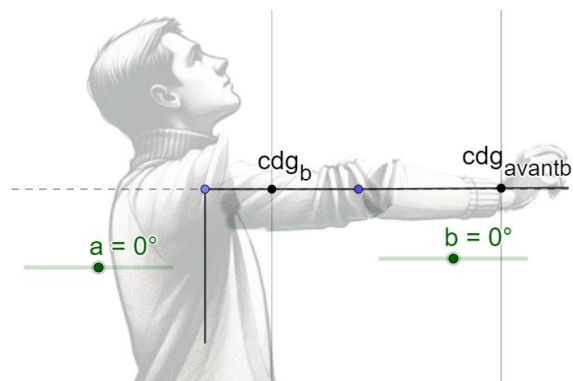
- Situació 1: La posició corpòria que crea un parell major sense càrrega addicional.
- Situació 2: La posició d'ús prevista.

Situació 1: Posició on es presenta un parell més elevat.

Es busca trobar la posició més desfavorable sense pes addicional, que causi un parell major, amb la finalitat d'estudiar el comportament de l'EXO sota condicions poc favorables. La situació més crítica, es planteja l'extensió total del braç, l'avantbraç i la mà. Aquesta s'observa quan el conjunt assoleix els 0° respecte a l'horitzontal, observat en la Fig 6.3.

Fig. 6.3

Situació 1. Diagrama de posició del braç on es presenta un parell més elevat

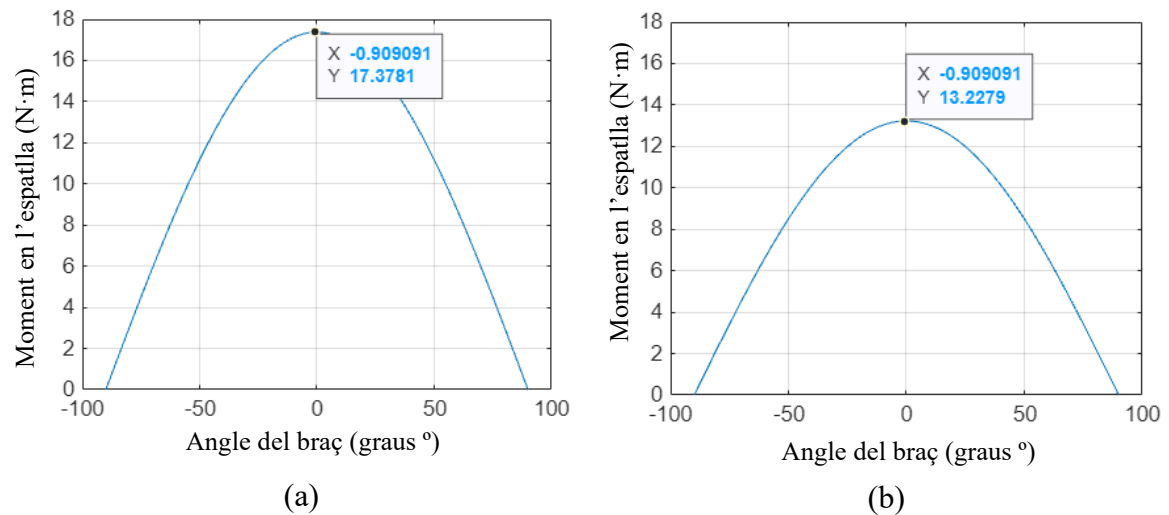


Nota: Diagrama de posició crítica d'ús. Vista des del pla sagital. Braç superior i avantbraç situats a 0° respecte a l'eix horitzontal. Generat mitjançant Geogebra. Font:[Elaboració pròpia a partir de [37]]

En la Fig. 6.4 obtingudes amb el codi annexat a -Annex III- ,s'observa un moment màxim als 90° , en el cas dels homes es troba un parell màxim de $17 \text{ N}\cdot\text{m}$ i en el de les dones $13 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Fig. 6.4

Gràfica del moment patit en l'espatlla dependent de la inclinació del braç.



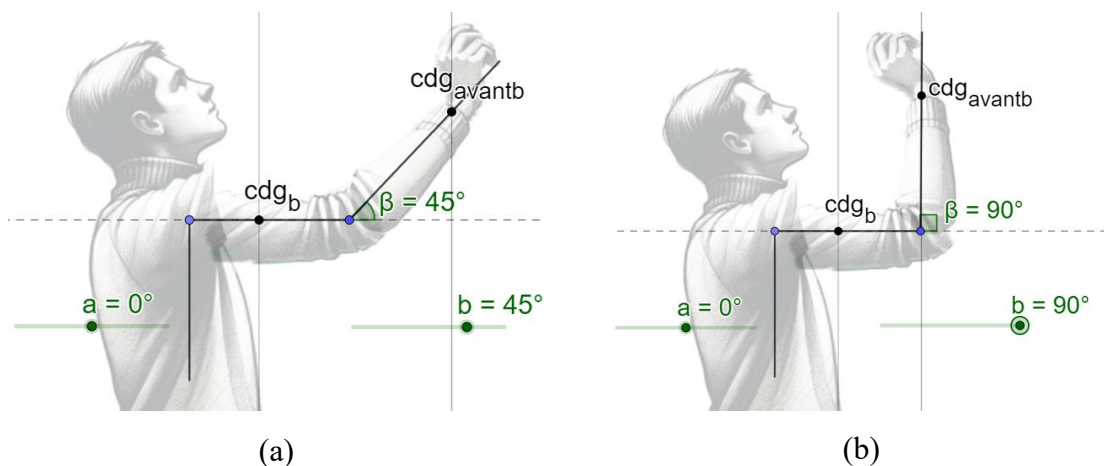
Nota: Situació 1. Gràfica generada amb MatLab. En l'eix vertical mostra el valor en N·m del moment presentat en l'articulació glenohumeral i en l'eix horitzontal l'angle de posició del braç respecte a pla horitzontal (α). (a) Moment presentant en els homes. (b) Moment presentat en les dones. *Font: [Elaboració pròpia]*

Situació 2: Posició d'ús previst.

Les posicions de treball més habituals observades en tasques d'instal·lació, independentment de l'angle del braç superior, l'avantbraç presenta una posició entre 45° i 90° en el pla sagital respecte a l'eix horitzontal. Aquestes posicions s'observen especialment en tasques d'instal·lació en sostres, com pot ser: instal·lació elèctrica, instal·lació de falsos sostres.

Fig. 6.5

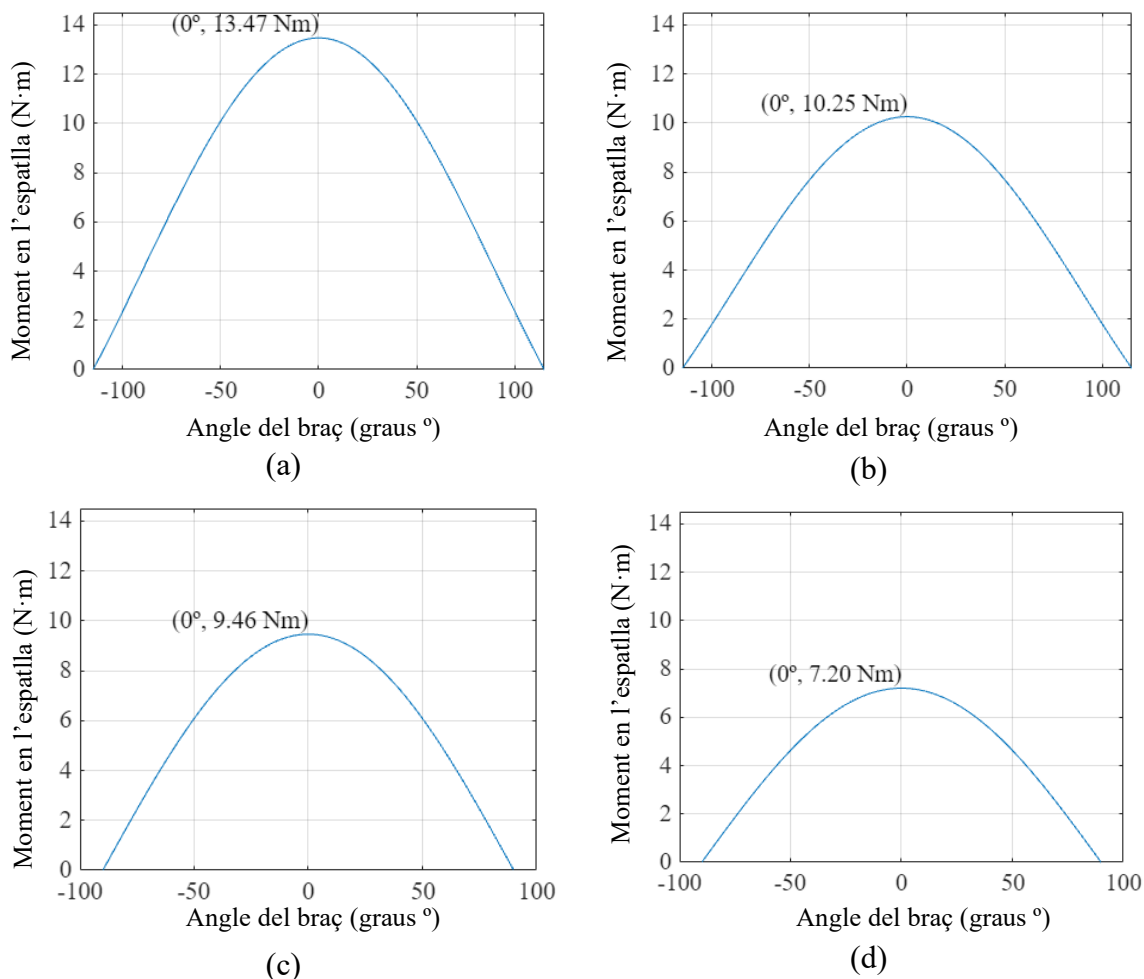
Situació 2. Diagrama de posició de l'avantbraç durant l'elevació del braç.



Nota: Diagrama de posició de l'avantbraç en relació amb l'eix horitzontal en el pla sagital independentment de la posició del braç superior. (a) Posició de l'avantbraç a 45° sentit horari a l'eix vertical. (b) Posició de l'avantbraç a 90° sentit horari a l'eix horitzontal. Generat mitjançant Geogebra. Font:[Elaboració pròpia a partir de [37]]

Fig. 6.6

Perfil del parell generat en la situació 2a



Nota: Situació 2. Gràfica generada amb MatLab. En l'eix vertical mostra el valor en N·m del moment de l'espatlla i en l'eix vertical l'angle de posició del braç respecte a la vertical de cos (α). (a) Moment presentant en els homes, situació 2a. (c) Moment presentant les dones, situació 2a. Moment presentant en els homes, situació 2b. (d) Moment presentant les dones, situació 2b. Font: [Elaboració pròpia]

En la posició 2a amb l'avantbraç a 45° , per a homes és igual a 13,47 N.m i per a dones resulta en un parell inferior, igual a 10,25 N·m. En contraposició, en la posició 2b, amb l'avantbraç

a 90° es presenten uns moments inferiors, amb un valor màxim de 9,46 N·m en homes i 7,20 N·m en dones.

S'ha decidit basar les recomanacions d'ús sota les condicions de la situació 2.b. Aquesta situació assegura no oferir un parell d'assistència superior al gravitacional, en conseqüència pot crear esforços contraris en l'articulació glenohumeral. Aquesta decisió ve recolzada amb la noció de la possibilitat de personalització del parell per al seu ús en diferents situacions.

Formulació.

$$\tau_b = m_b \cdot g \cdot x_b \quad (7.1)$$

$$\tau_b = p \cdot 0,028 \cdot 0,186 \cdot 0,436 \cdot h \cdot \cos(\alpha)$$

$$\tau_b = p \cdot 2,270688 \cdot 10^{-3} \cdot h \cdot \cos(\alpha)$$

$$\tau_a = m_a \cdot g \cdot x_a \quad (7.2)$$

$$\tau_a = p \cdot 0,022 \cdot g \cdot (0,682 \cdot 0,256 \cdot h \cdot \cos(\beta) + h \cdot 0,186 \cdot \cos(\alpha))$$

$$\tau_a = 0,022 \cdot p \cdot g (0,174592 \cdot h \cdot \cos(\beta) + h \cdot 0,186 \cdot \cos(\alpha))$$

$$\tau_t = \tau_b + \tau_a \quad (7.3)$$

- p Pes de l'usuari (kg).
- m_b Massa del braç (kg).
- x_b Distància en x des de el centre de gravetat del braç fins l'espatlla (mm).
- m_a Massa del braç (kg).
- α Angle d'inclinació del braç superior respecte a l'horitzontal (°)
- x_a Distància en x des de el centre de gravetat de l'avantbraç fins l'espatlla (mm).
- h Alçada de l'usuari (mm).
- β Angle d'inclinació del avantbraç respecte a l'horitzontal (°)
- g Acceleració de la gravetat equivalent a 9,81 (m/s²).

Aplicació

Taula 6.1

Parell de l'articulació glenohumeral dependent del pes i alçada de l'usuari.

α	β	Alçada (m)	Pes (kg)	τ_a (N·m)	τ_b (N·m)	τ_t (N·m)
Situació 1						
		1,40	40	4,36	0,13	4,49
0	0	1,70	85	11,25	0,33	11,57
		2,10	185	30,23	0,88	31,12
Situació 2.a						
		1,4	40	3,74	0,13	3,87
0	45	1,7	85	9,65	0,33	9,98
		2,1	185	25,95	0,88	26,83
Situació 2.b						
		1,4	40	2,25	0,13	2,38
0	90	1,7	85	5,80	0,33	6,13
		2,1	185	15,60	0,88	16,48

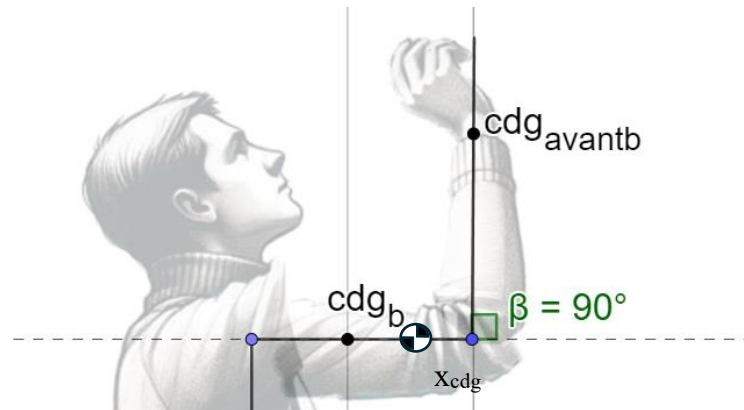
Nota: Resultat dels parells presentats en l'articulació glenohumeral en les tres situacions presentades. Resultats adjuntats a – Annexos VII- Taules VII.1-3. Parell en l'articulació glenohumeral-. Font: [Elaboració pròpia].

6.2.2. Càlcul de la ubicació del centre de gravetat en la Situació 2.b.

L'estimació de la situació 2.b, amb el braç a $\alpha = 0^\circ$ i l'avantbraç a $\beta = 90^\circ$, posició observada a la Fig. 6.7.

Fig. 6.7

Centre de gravetat del conjunt del braç



Nota: Il·lustració representativa de la ubicació del centre del braç. Generat mitjançant Geogebra. Font: [Elaboració pròpia a partir de OPEN-AI [37]]

Càlcul

$$m_b = p \cdot 0,028 \quad (7.4)$$

$$x_b = 0,186 \cdot 0,436 \cdot h \cdot \cos(\alpha) \rightarrow 0,081096 \cdot h \quad (7.5)$$

$$m_a = p \cdot 0,022 \quad (7.6)$$

$$x_a = ((0,146 + 0,108) \cdot 0,683 \cdot \cos(\beta) + 0,186 \cdot \cos(\alpha)) \cdot h \rightarrow \quad (7.7)$$

$$x_a = 0,186 \cdot h$$

$$x_{cdg} = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i} \rightarrow x_{cdg} = \frac{m_b x_b + m_a x_a}{m_b + m_a} \rightarrow \quad (7.8)$$

$$x_{cdg} = \frac{p \cdot 0,028 \cdot 0,186 \cdot 0,436 \cdot h + p \cdot 0,022 \cdot 0,186 \cdot h}{p \cdot 0,028 + p \cdot 0,022}$$

$$x_{cdg} = \frac{h \cdot 6,303688 \cdot 10^{-3}}{0,05} \rightarrow h \cdot 0,126073$$

- p Pes de l'usuari (kg).
- m_b Massa del braç (kg).

- x_b Distància en x des del centre de gravetat del braç fins a l'espatlla (mm).
- m_a Massa del braç (kg).
- α Angle d'inclinació del braç superior respecte a l'horitzontal ($^\circ$).
- x_a Distància en x des del centre de gravetat de l'avantbraç fins a l'espatlla (mm).
- h Alçada de l'usuari (mm).
- β Angle d'inclinació de l'avantbraç respecte a l'horitzontal ($^\circ$).
- g Acceleració de la gravetat equivalent a $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$.
- x_{cdg} Distància del centre de gravetat des de l'articulació glenohumeral (mm).

Aplicació

Per a una persona amb pes corporal de 185kg i alçada de 2100mm, la distància del centre de gravetat és:

$$x_{cdg} = 2100\text{mm} \cdot 0,126073 \rightarrow x_{cdg} = 264,75\text{mm} \quad (7.9)$$

En Taula VII.5 de -l'Annex VII- es troben els valors dels centres de gravetat del braç en la situació 2.b, on es recomana l'aplicació del suport d'interfície entre el braç i el model.

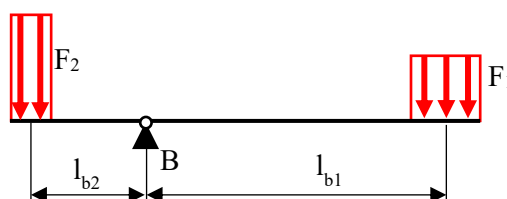
6.2.3. Càlcul de la longitud de barra per a la compensació gravitacional.

Amb l'objectiu de determinar la força de reacció necessària per a la compensació gravitacional, es delimita una longitud de compensació del pes limitada entre 0mm i 116mm. Aquesta limitació ve arrelada a permetre la mobilitat de l'usuari sense inferència en moviment com la retracció prostració escapular, així com evitar interferència entre el sistema de compensació del braç esquerre amb la compensació del braç dret.

Es calcula la longitud necessària de la barra per a produir un avantatge mecànic necessària per trobar un equilibri en la palanca.

Fig. 6.8

Diagrama de cos lliure de la barra b



Nota: Diagrama de cos lliure de la barra b de l'exoesquelet. Font: [Elaboració pròpia]

La força vertical d'entrada F_1 actuant en la barra b sobre la superfície d'interfície del braçatet corresponent a un valor de 60mm. La força F_2 correspon al valor de la força tensora del cable connectat a la molla sobre la superfície d'aplicació de 10mm de l'accessori d'interconnexió.

$$\sum F_x = 0; \quad (7.10)$$

$$\sum F_y = 0; \quad B_y = \frac{F_2}{10 \text{ mm}} \cdot 10\text{mm} + \frac{F_1}{60 \text{ mm}} \cdot 60\text{mm} \quad (7.11)$$

$$B_y = F_2 + F_1$$

$$\sum M_B = 0; \quad (7.12)$$

$$0 = \frac{F_2}{10 \text{ mm}} \cdot 10\text{mm} \cdot l_{b2} - \frac{F_1}{60 \text{ mm}} \cdot 60\text{mm} \cdot l_{b1} \quad (7.13)$$

$$0 = F_2 \cdot l_{b2} - F_1 \cdot l_{b1}$$

$$\tau_{\max (2.b)} = 24,9 \text{ N} \cdot \text{m} \rightarrow F_2 \cdot l_{b2} = 24,9 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.14)$$

$$\tau_{\min (2.b)} = 3,5 \text{ N} \cdot \text{m} \rightarrow F_2 \cdot l_{b2} = 3,5 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.15)$$

$$\frac{l_{b2 \max}}{l_{b2 \min}} = \frac{24,9 \text{ N}}{3,5 \text{ N}} = 7,11$$

- F_x Forces actuants en l'eix x (N).
- F_y Forces actuants en l'eix y (N).
- M_B Moments actuants en l'articulació B (N·mm).
- B_y Forces de reacció en l'articulació B (N).
- l_{b1} Longitud des del punt de fulcre fins al punt d'interfície amb el braç (mm).
- l_{b2} Longitud des del punt de fulcre fins al punt d'actuació de la força F_2 (mm).
- $l_{b2 \max}$ Longitud des del punt de fulcre fins al punt d'actuació de la força F_2 en extensió màxima.
- F_1 Força gravitacional del braç sencer (N).
- F_2 Força tensora del cable de transmissió de la molla (N).
- $\tau_{\max (2.b)}$ Parell màxim en la situació 2.b: 24,3N·m.
- $\tau_{\min (2.b)}$ Parell mínim en la situació 2.b: 3,5 N·m.

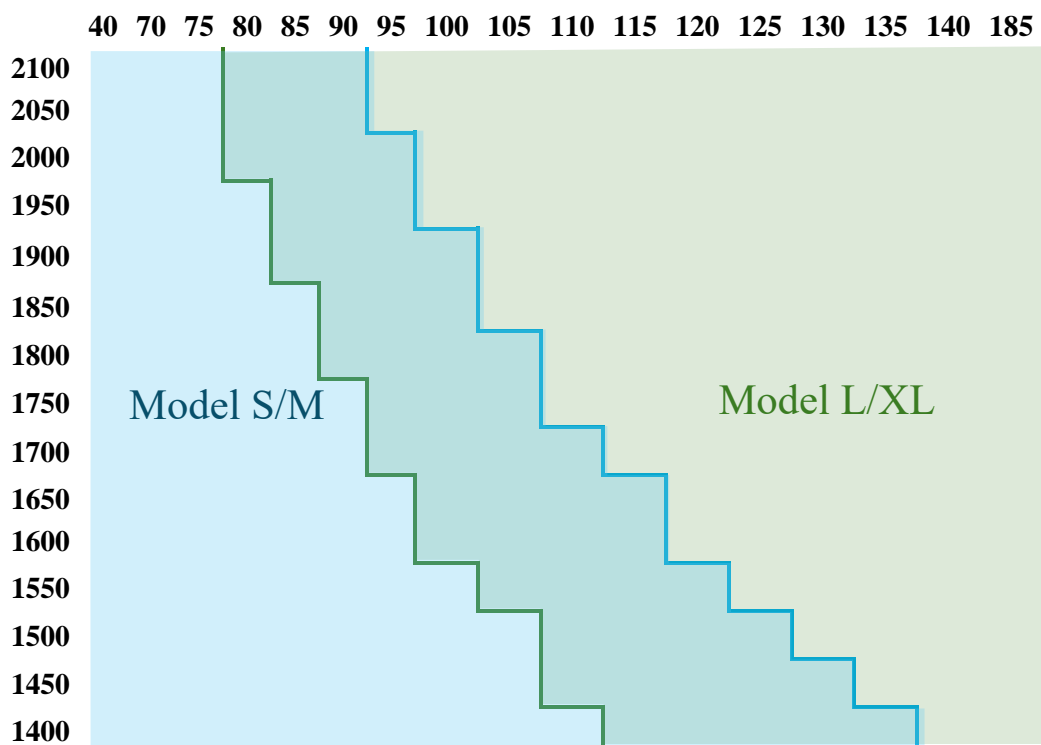
6.2.4. Tallatge i adaptabilitat.

En l'apartat anterior, 6.2.3, es troba una relació entre l'extensió màxima i mínima de la barra l_{b2} equivalent a 7,11. Aquest valor resultant compromet el disseny del model. Per a la compensació del parell es requereixen altes forces d'aplicació o una gran longitud de barra, les molles de força o parell comercialitzades com més parell, o força proporcionen, més grans són les dimensions del dispositiu i conseqüentment del seu pes. Per aquest motiu, per tal d'oferir una gran adaptabilitat amb la finalitat d'acomodar un extens rang de dimensions i pesos dels usuaris s'ha optat pel disseny de dos models.

El model S/M i L/XL abasten una variada demografia amb rangs d'altures entre 1,4m i 2,1m i un rang de pes de l'usuari de 40kg fins a 185kg. Incloent diferències significatives en l'estatura i la massa corporal, es busca garantir que homes i dones puguin beneficiar-se del seu ús. Es té presència dels valors tan allunyats dels valors mitjans d'alçada i pes, aquest no precisament s'inclouen per proporcionar assistència a persones amb les dites característiques sinó per proporcionar una àmplia variació del parell i facilitar la personalització.

Taula 6.2

Classificació de tallatge segons alçada i pes



Nota: Es mostren els rangs d'alçada i pes de l'usuari amb la recomanació de model d'ús, model S/M i L/XL. En l'eix vertical es troba l'alçada total de l'usuari en mil·límetres, en l'eix horitzontal el pes total de l'usuari en kg. Taula completa a -Annex VII-.
Font:[Elaboració pròpia]

Mitjançant aquest tallatge es busca oferir un parell variable de 0 N·m a 24,2 N·m, per tal d'assistir en la compensació gravitacional del braç en un $\approx 100\%$ per a persones entre 40kg fins a 185kg i 1,4m i 1,2m d'alçada.

Model S/M

$$\tau_{\max (2.b)} = 11,9 N \cdot m \rightarrow F_2 \cdot l_{b2} = 11,9N \cdot m \quad (7.14)$$

$$\tau_{\min (2.b)} = 3,5 N \cdot m \rightarrow F_2 \cdot l_{b2} = 3,5N \cdot m \quad (7.15)$$

$$\frac{l_{b2 \max}}{l_{b2 \min}} = \frac{11,9N}{3,5N} = 3,4$$

Model L/XL

$$\tau_{\max (2.b)} = 24,2 N \cdot m \rightarrow F_2 \cdot l_{b2} = 24,2N \cdot m \quad (7.16)$$

$$\tau_{\min (2.b)} = 10,2 N \cdot m \rightarrow F_2 \cdot l_{b2} = 10,2N \cdot m \quad (7.17)$$

$$\frac{l_{b2 \max}}{l_{b2 \min}} = \frac{24,2N \cdot m}{10,2N \cdot m} = 2,37$$

- l_{b2} Longitud des del punt de fulcre fins al punt d'actuació de la força F_2 (mm).
- $l_{b2 \max}$ Longitud des del punt de fulcre fins al punt d'actuació de la força F_2 en extensió màxima.
- F_2 Força tensora del cable de transmissió de la molla (N).
- $\tau_{\max (2.b)}$ Parell màxim en la situació 2.b:
 - En el model S/M $11,9 N \cdot m$
 - En el model L/XL $24,2 N \cdot m$
- $\tau_{\min (2.b)}$ Parell mínim en la situació 2.b:
 - En el model S/M $3,5 N \cdot m$
 - En el model L/XL $10,2 N \cdot m$

6.2.5. Selecció de la molla.

Mitjançant un procés d'iteració, s'ha seleccionat una molla de parell constant capaç de proporcionar una força adient perquè la $l_{b2\ max}$ no comprometi la comoditat de l'usuari. Per al desenvolupament del mecanisme de compensació gravitacional en els models EXOumerus, s'ha considerat com a adient la selecció del catàleg estandarditzat de l'empresa Vulcan Spring [46], la molla amb nomenclatura: X8U84. Aquesta selecció és deguda a l'equilibri entre el parell transmès i les dimensions de l'equip.

Fig. 6.9

Molla 'Contorque' X8U84



Nota: Model 3D en base al catàleg Vulcan Spring "Metric desing guide". Nomenclatura X8U84. Renderitzat CAD realitzat en SolidWorks. Font [Elaboració pròpia]

El parell proporcionat per la molla és equivalent a 1242 N·mm. Mitjançant la interconnexió del sistema amb un cable tensor subjectat en un tambor de diàmetre 20mm es transmet el parell de gir a una força lineal equivalent a:

$$F_2 = \frac{\tau_{molla}}{r_{tambor}} \quad (7.18)$$

$$F_2 = \frac{1242N \cdot mm}{10mm} \rightarrow F_2 = 124,2N$$

Model S/M

$$F_2 \cdot l_{b2} = 11,9N = 0 \rightarrow l_{b2} = \frac{11,9 N \cdot m}{F_2} \quad (7.14)$$

$$l_{b2} = \frac{11,9N \cdot m}{142,4N} \rightarrow l_{b2} = 0,0835m \rightarrow \mathbf{l_{b2} = 83,5mm}$$
(7.15)

$$F_2 \cdot l_{b2} = 3,4N = 0 \rightarrow l_{b2} = \frac{3,5 N \cdot m}{F_2}$$

$$l_{b2} = \frac{3,5N \cdot m}{142,4N} \rightarrow l_{b2} = 0,0245m \rightarrow \mathbf{l_{b2} = 24,5mm}$$

Model L/XL

$$F_2 \cdot l_{b2} = 24,2N = 0 \rightarrow l_{b2} = \frac{24,2 N \cdot m}{F_2}$$
(7.16)

$$l_{b2} = \frac{24,2N \cdot m}{142,4N} \rightarrow l_{b2} \approx 0,170m \rightarrow \mathbf{l_{b2} \approx 170mm}$$

$$F_2 \cdot l_{b2} = 10,2N = 0 \rightarrow l_{b2} = \frac{10,2 N \cdot m}{F_2}$$
(7.17)

$$l_{b2} = \frac{10,2N \cdot m}{142,4N} \rightarrow l_{b2} = 0,0716m \rightarrow \mathbf{l_{b2} = 71.6mm}$$

La longitud de barra l_{b2} obtinguda amb el parell màxim de compensació $24,2N \cdot m$, amb valor $170mm$, es considera com una longitud que crea interferència entre els models drets i esquerres, en especial en usuaris d'amplada d'esquena reduïda. En conseqüència, es valora l'ús de dues molles en configuració sumatòria. El valor del parell d'assistència de la molla L/XL equival a $2848N \cdot mm$, com bé s'observa en (7.19).

$$\tau_{molla L/XL} = 1424N \cdot mm \cdot 2 \rightarrow \tau_{molla L/XL} = 2848N \cdot mm$$
(7.19)

$$F_{2 L/XL} = \frac{2848N \cdot mm}{10mm} \rightarrow F_{2 L/XL} = 284,8N$$
(7.18)

Model L/XL

$$F_{2 L/XL} \cdot l_{b2} = 24,2N = 0 \rightarrow l_{b2} = \frac{24,2 N \cdot m}{F_{2 L/XL}}$$
(7.16)

$$l_{b2} = \frac{24,2N \cdot m}{284,8N} \rightarrow l_{b2} = 0,085m \rightarrow l_{b2} = \mathbf{85mm}$$

$$F_{2L/XL} \cdot l_{b2} = 10,2N = 0 \rightarrow l_{b2} = \frac{10,2N \cdot m}{F_{2L/XL}} \quad (7.17)$$

$$l_{b2} = \frac{10,2N \cdot m}{284,8N} \rightarrow l_{b2} = 0,0358m \rightarrow l_{b2} = \mathbf{35,8mm}$$

- τ_{molla} parell de la molla (N·m).
- r_{tambor} Radi del tambor de transmissió de la molla (mm).
- F_2 Força efectuada per la torsió de la molla (N)
- l_{b2} Longitud des del punt de fulcre fins al punt d'actuació de la força F_2 (mm).

6.2.6. Càlcul voltes mínimes del cable tensor.

El cable tensor, durant la moció de la barra conductora del parell de compensació, té un recorregut equivalent a doble de la longitud $l_{b2} \cdot 2$, degut a la seva presenta variació superior a 180° . El punt màxim d'extensió i reducció es troba quan el braç, conseqüentment la barra b_2 , es troba a 90° i 270° respecte a l'horitzontal.

$$y_{RdT Max} = l_{b2Max} \cdot 2 \quad (7.20)$$

$$y_{RdT Max} = 116mm \cdot 2 \rightarrow y_{RdT Max} = 232mm$$

S'ha tingut en compte que el model presentat permet una regulació de longitud la configuració de barres a , permetent una adaptabilitat per a persones des de 1400mm fins a 2100mm

$$Variació_a = 0,34 \cdot (h_{max} - h_{min}) \quad (7.21)$$

$$Variació_a = 0,34 \cdot (2100 - 1400)$$

$$Variació_a = 238mm$$

$$y_{total} = y_{RdT Max} + Variació_{ba} \quad (7.22)$$

$$y_{total} = 232mm + 238mm$$

$$y_{total} = 470mm$$

$$Perimetre_{sp2} = D_{s2} \cdot \pi \quad (7.23)$$

$$Perimetre_{sp2} = 20 \cdot \pi$$

$$Perimetre_{sp2} = 62,83mm$$

$$V_{sp2} = \frac{y_{total}}{Perimetre_{sp2}} \quad (7.24)$$

$$V_{sp2} = \frac{470 \text{ mm}}{62,83mm} \rightarrow V_{sp2} = 7,48$$

- $y_{RdT \text{ Max}}$ Recorregut en l'eix y del punt de fixació del cable tensor en la barra (mm).
- $l_{b2 \text{ max}}$ Longitud des de el punt de fulcre fins al punt d'actuació de la força F_2 en extensió màxima durant un recorregut de 180° (mm).
- $Variació_a$ variació permesa de la longitud de la barra a (mm).
- y_{total} Longitud des del punt de fulcre fins al punt d'actuació de la força F_2 en extensió màxima durant un recorregut de 180° més la variació de la regulació de la barra a (mm).
- $Perimetre_{sp2}$ Perímetre del tambor de transmissió de la molla (mm).
- V_{sp2} Voltes necessàries del tambor de transmissió de la molla.

6.2.7. Càlcul del diàmetre de cable tensor.

Per tal de determinar el diàmetre adequat de la corda d'acer, s'estableix que la càrrega màxima de treball és 284.8N. S'opta per determinar un alt factor de seguretat per assegurar que la corda no falla sota càrregues inesperades. El factor de seguretat determinat equival a 5.

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (7.25)$$

$$F_{2L/XL} \cdot FOS = A \cdot \sigma \quad (7.26)$$

$$284,8N \cdot 5 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 485 \text{ N/mm}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 1424N}{\pi \cdot 485N/mm^2}} \rightarrow d = 1,936mm \approx 2mm$$

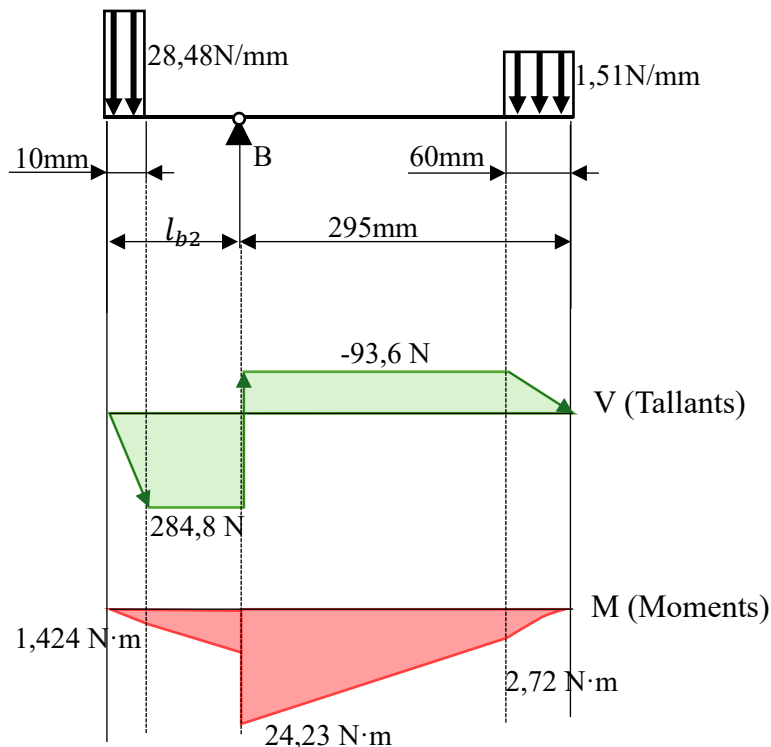
- A Àrea de la secció transversal del cable (mm^2).
- σ Resistència a la tracció de l'acer inoxidable 316L (N/mm^2).
- FOS Factor de seguretat.
- $F_{2L/XL}$ Força de tracció vertical del cable en el model L/XL (N).

6.2.8. Verificació de l'eficiència de la molla en la compensació gravitacional.

Càlcul per al model L/XL

Fig. 6.10

Diagrama d'esforços interns de la barra b



Nota: Diagrama d'esforços tallants i moments provocat sota les condicions on l'usuari pesa 185kg i mesura 2,10m. Considerades com les pitjors condicions permeses del sistema sense pes addicional. Els perfils observats no representen una escala dels valors obtinguts.

Font:[Elaboració pròpia]

$$\sum F_x = 0; \quad (7.10)$$

$$\sum F_y = 0; \quad B_y = 28,48 \frac{N}{mm} \cdot 10mm + 1,52 \frac{N}{mm} \cdot 60mm \quad (7.11)$$

$$B_y = 375,54N$$

$$\overset{+}{\curvearrowright} \sum M_B = 0; \quad (7.12)$$

$$0 = 28,48 \frac{N}{mm} \cdot 10mm \cdot \left(l_{b2} - \frac{10mm}{2} \right) - 1,52 \frac{N}{mm} \cdot 60mm \cdot 267mm \quad (7.13)$$

$$0 = 284,8N \cdot \left(l_{b2} - \frac{10mm}{2} \right) - 24228,24 N \cdot mm$$

$$l_{b2} - 5 = \frac{24228,24 N \cdot mm}{284,8 N}$$

$$l_{b2} = 90,07mm$$

$$\text{Avantatge mecànic: } am = \frac{F_2}{F_1 L/XL} \rightarrow am = \frac{128N}{284,8N} \rightarrow am = 0,5 \quad (7.27)$$

- F_x Forces actuants en l'eix x (N).
- F_y Forces actuants en l'eix y (N).
- M_B Moments actuants en l'articulació B (N·mm).
- B_y Forces de reacció en l'articulació B (N).
- l_{b2} Longitud des del punt de fulcre fins al punt d'actuació de la força F_2 (mm).
- $l_{b2 \max}$ Longitud des del punt de fulcre fins al punt d'actuació de la força F_2 en extensió màxima.
- F_1 Força gravitacional del braç sencer (N).
- F_2 Força tensora del cable de transmissió de la molla del model L/XL (N).
- am avantatge mecànic.

Visualitzar els resultats en -Annex VII- en la Tula.VII.5 per a visualitzar els valors en el Model S/M i la Taula VII.6 els valors en el Model L/XL.

El resultat de l'avantatge mecànic recomanada és igual a 0,5. Aquest valor pot ser regulable mitjançant la regulació de la barra de transmissió

6.2.9. Càlcul de les longituds del conjunt *b*.

Es busca oferir un suport en el punt de gravetat del col·lectiu del braç per a la situació 2.b, per a persones entre 2,1m fins a 1,4m. D'aquesta manera, és necessari oferir una subjecció que permeti la regulació de la longitud per a persones entre 1400mm i 2100mm d'alçada. S'ha decidit implementar un mecanisme telescòpic amb abraçadores bloqueig.

En conseqüència, el conjunt de barres *b* cal que incorpori dos mecanismes telescòpics per a garantir l'adaptabilitat. Un mecanisme per a l'ajust del punt d'interfície, idealment ubicat al centre de gravetat, i un segon per l'ajust del parell.

Així doncs, es determina que la barra l'_1 ha de permetre la variació de longitud, amb una longitud màxima de 177mm i una mínima de 265mm, mostrat en (6.6).

$$x_{cdg} = h \cdot 0,126073 \quad (7.28)$$

$$x_{cdg}(1400mm) = 1400mm \cdot 0,126073 \rightarrow x_{cdg}(1400mm) \approx 177mm$$

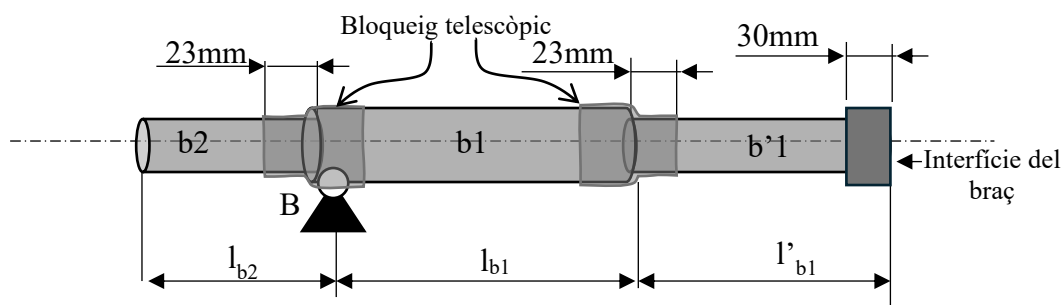
$$x_{cdg}(2100mm) = 2100mm \cdot 0,126073 \rightarrow x_{cdg}(2100mm) \approx 265mm$$

- h Alçada de l'usuari (mm).
- x_{cdg} Distància del centre de gravetat des de l'articulació glenohumeral (mm).

La longitud del punt de fulcre fins a la subjecció màxima és 265mm i la mínima 177mm. Tint en compte les distàncies dels accessoris com ve a ser el braçalet d'interfície amb el braç (30mm) i la longitud necessària per al bloqueig telescòpic (23mm).

Fig. 6.11

*Diagrama de les longituds de les barres del conjunt *b* en la seva màxima longitud*

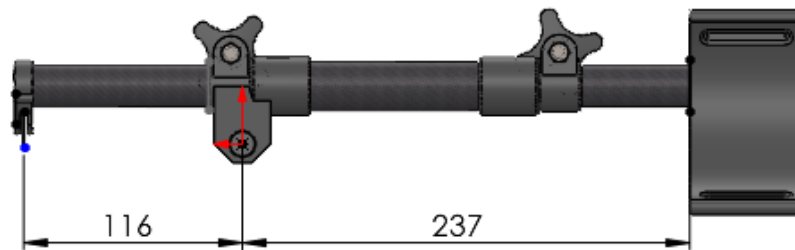


Nota: Diagrama il·lustratiu de les longituds de barra involucrades en el mecanisme telescòpic de conjunt *b*. Font: [Elaboració pròpia]

6.2.10. Força màxima d'assistència dels models.

Fig. 6.12

Dimensions en l'extensió màxima del subconjunt b



Nota: Captura de pantalla de model CAD de SolidWorks del subconjunt *b* amb les cotes de les dimensions amb el braç completament estès. Font: [Elaboració pròpia]

$$F_2 \cdot L_2 = x_{cdg}(1400\text{mm}) \cdot F_{\text{assistència}} \quad (7.29)$$

$$F_2 \cdot L_2 = h \cdot 0,126073 \cdot F_{\text{assistència}}$$

$$F_{\text{assistència}} = \frac{F_2 \cdot L_2}{h \cdot 0,126073}$$

$$\text{Compensació del braç} = g \cdot m_b + m_a \quad (7.30)$$

$$\text{Compensació del braç} = p \cdot 9,81\text{m/s}^2 \cdot (0,022 + 0,028)$$

$$\text{Addicional} = F_{\text{assistència}} - \text{Compensació del braç} \quad (7.31)$$

Taula 6.3

Força d'assistència dels models dependent de l'avantatge mecànic del sistema – Situació 2.b.

h (mm)	$F_{assistència}$				Total	
	Compensació del braç		Addicional			
Model S/M						
	P (kg)	40	85	40	85	
2100		19,6	41,7	42,8	20,7	62,4
1400		19,6	41,7	74	51,9	93,6
Model L/XL						
	P (kg)	80	185	80	185	
2100		39,2	90,7	85,5	34	125
1400		39,2	90,7	148	96,4	187

Nota: Força d'assistència gravitacional addicional i compensació del pes del braç dependent de l'avantatge mecànic i pes aplicat. Situació 2.b. Font: [Elaboració pròpia]

Els resultats aplicats a tot el rang d'alçades est troben adjuntats en -l'Annex VII- en la Taula VII.8 per al model S/M i la Taula VII.9 per al model L/XL.

L'avantatge mecànic de la palanca permet la subjecció d'un pes addicional d'entre 2,1kg i 7,54kg amb el model S/M i un avantatge de 3,5kg i 7,5kg en el model L/XL. Aquestes condicions es complexin a la situació 2.b.

Mitjançant el càlcul realitzat, s'observa en la Taula 6.3 com la força màxima que pot proporcionar el sistema mantenint l'equilibri és de 187N amb el model L/XL i 93,6N amb el model S/M. Les situacions que creen un parell major són la força de 624N i 125N a 267mm.

$$\tau_{B=0} = x_{cdgb} \cdot F_b + x_{cdga} \cdot F_b + F_{ad} \cdot h \cdot (0,186 + 0,256) - F_2 \cdot l_{b2} \quad (7.32)$$

$$\tau_{B=0} = x_{cdgb} \cdot g \cdot m_b + h \cdot (0,186 + 0,256 \cdot 0,682) \cdot g \cdot m_a + F_{ad} \cdot h \cdot (0,186 + 0,256) - F_2 \cdot l_{b2}$$

$$\tau_{B=0} = h \cdot 0,126073 \cdot 9,81m/s^2 \cdot p \cdot 0,028 + h \cdot (0,186 + 0,256 \cdot 0,682) \cdot 9,81m/s^2 \cdot p \cdot 0,022 + F_{ad} \cdot h \cdot (0,186 + 0,256) - F_2 \cdot l_{b2}$$

$$-F_{ad} \cdot h \cdot (0,186 + 0,256) = h \cdot 0,126073 \cdot 9,81m/s^2 \cdot p \cdot 0,028 + h \cdot (0,186 + 0,256 \cdot 0,682) \cdot 9,81m/s^2 \cdot p \cdot 0,022 - F_2 \cdot l_{b2}$$

$$F_{ad} = -\frac{h \cdot 1,23677 \cdot p \cdot 0,028 + h \cdot 3,537 \cdot p \cdot 0,022 - F_2 \cdot l_{b2}}{h \cdot 0,442}$$

- h Alçada de l'usuari (mm).
- $\tau_{B=0}$ Parell en l'articulació B equivalent a 0 (N·mm).
- l_{b2} Longitud des del punt de fulcre fins al punt d'actuació de la força F_2 (mm).
- x_{cdgb} Distància del centre de gravetat del braç superior des de l'articulació glenohumeral (mm).
- x_{cdga} Distància del centre de gravetat de l'avantbraç des de l'articulació del colze (mm).
- g Acceleració de la gravetat equivalent a $9,81$ (m/s^2).
- F_b Pes de la zona del braç superior (N).
- F_{ad} Pes de l'avantbraç i mà (N).
- F_{ad} Pes addicional de subjecció en la mà (N).
- F_2 Força tensora del cable de transmissió de la molla del model L/XL (N).

Taula 6.4

Força d'assistència dels models dependent de l'avantatge mecànic del sistema – Situació 1.

h (mm)	$F_{assistència}$				Total	
	Compensació del braç		Addicional			
Model S/M						
	P (kg)	40	85	40	85	
2100		19,6	41,7	7,65	-3,773	62,4
1400		19,6	41,7	16,5	5,1253	93,6
Model L/XL						
	P (kg)	90	185	80	185	
2100		39,2	90,7	15,3	-11,35	124,8
1400		39,2	90,7	33,1	6,4444	187,2

Nota: Força d'assistència gravitacional addicional i compensació del pes del braç dependent de l'avantatge mecànic i pes aplicat. Situació 2.b. Font: [Elaboració pròpia]

Els resultats aplicats a tot el rang d'alçades est troben adjuntats en -l'Annex VII- en la Taula VII.10 per al model S/M i la Taula VII.11 per al model L/XL.

S'observa com en la situació 1, comporta un parell més elevat comportant l'eficiència del model. El mecanisme de palanca no és capaç de mantenir l'equilibri del conjunt en usuaris d'alçada 2100mm i pes 185kg. No obstant s'observa que per a usuaris de menors proporcions antropomètriques, el model pot arribar a proporcionar una força addicional de 1,68N en el model S/M i 3,37N en el model L/XL.

6.2.11. Càlcul de pandeig.

6.2.11.1. Pandeig en la barra a2.

Moment d'inèrcia.

$$I = \frac{\pi}{64} (D_e^4 - D_i^4) \quad (7.33)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (18^4 - 15^4) \rightarrow I = 2,67 \cdot 10^3 mm^4 \rightarrow I = 2,67 \cdot 10^{-7} m^4$$

Carga crítica de pandeig

$$c_p = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (7.34)$$

$$c_p = \frac{\pi^2 \cdot 228 \cdot 10^9 Pa \cdot 2,67 \cdot 10^{-7} m^4}{0,295^2 m} \rightarrow c_p = 8,49 \cdot 10^6 N$$

- L Longitud de la barra a2: 295mm
- De Diàmetre exterior: 18mm
- Di Diàmetre interior: 15mm
- Força aplicada: 470,4N
- E Mòdul de Young en la compressió (material ortotròpic): 228 GPa
- I moment d'inèrcia (m⁴)
- C_p Càrrega crítica de pandeig (N)

El càlcul de pandeig mostra uns valors que indiquen un sobredimensionant del disseny per a la resistència de pandeig.

6.2.11.2. Pandeig en la barra a3

Moment d'inèrcia.

$$I = \frac{\pi}{64} (D_e^4 - D_i^4) \quad (7.33)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (22^4 - 19^4) \rightarrow I = 5,101 \cdot 10^3 mm^4 \rightarrow I = 5,1 \cdot 10^{-7} m^4$$

Carga crítica de pandeig

$$c_p = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (7.34)$$

$$c_p = \frac{\pi^2 \cdot 228 \cdot 10^9 Pa \cdot 5,1 \cdot 10^{-7} m^4}{0,229^2 m} \rightarrow c_p = 5.01 \cdot 10^6 N$$

- L Longitud de la barra a2: 229mm
- De Diàmetre exterior: 22mm
- Di Diàmetre interior: 19mm
- Força aplicada: 470,4N
- E Mòdul de Young en la compressió (material ortotròpic): 228 GPa
- I moment d'inèrcia (m⁴)
- C_p Càrrega crítica de pandeig (N)

6.3. Simulacions CAD.

El següent apartat està destinat a mostrar les simulacions d'elements finits realitzades en els conjunts del model:

- Conjunta b
- Conjunt a
- Conjunt z

En la present memòria només es mostren les tensions VonMises i els factors de seguretat resultants en els components en condicions crítics dels conjunts. L'estudi complet dels elements de forma individual es troben annexats en -l'Annex VII: Simulació CAD-.

Els diferents conjunts s'estudien separatament sota les condicions amb major carrega o major parrell de sol·licitació. Mitjançant el següent seguit de simulacions d'elements finits, es busca observar i analitzar la resposta dels elements sota les condicions més adverses així com anàlisis topològics per evitar el sobredimensionat del model.

6.3.1. Conjunt b

En el següent estudi d'elements finits del conjunt *b* mostra inicialment l'estudi col·lectiu del conjunt *b* amb les components de carbó-fibra i finalitza amb el desplaçament de reaccions de cada component individualment. Es simulen 4 tipus d'anàlisi:

- Tensions de Von Mises
- Desplaçaments
- Deformacions unitàries
- Factor de seguretat.

Sota dues situacions diferents:

- Situació 1: parell màxim de compensació
- Situació 2.b: parell màxim de compensació

Al llarg de les simulacions s'utilitza el parell màxim d'assistència produït en el model L/XL degut a que el model es troba sota més sol·licitació que en el cas del model S/M. Aquest parell té un valor de:

$$\tau_{Max} = b_{3Max} \cdot F_{2L/XL} \quad (6.35)$$

$$\tau_{Max} = 0,116m \cdot 284,8N$$

$$\tau_{Max} = 33,03N \cdot m$$

6.3.1.1. Conjunt b: Situació 2.b sota el parell màxim de compensació

Se simula la situació 2.b, on l'usuari presenta una orientació total del braç de 0° respecte a l'horitzontal. S'estudia el comportament del sistema sota les condicions d'un usuari d'alçada 2,1 m i 195kg de pes corporal.

El mallat utilitzat, s'ha considerat òptim i efectiu l'ús de mallat basat en curvatura, en base a la simplicitat del model. Les escales observades en les simulacions del conjunt *b* són de 44,6684.

Taula 6.5

Valors de la simulació del conjunt b sota situació 2.b: amb pes addicional

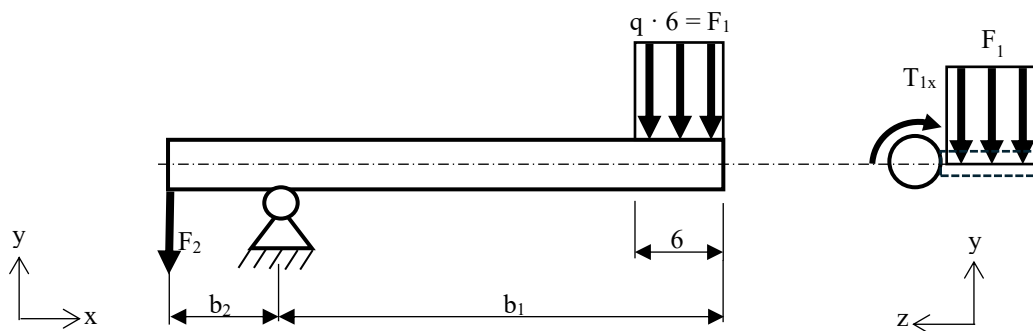
Identificador	Valor	Unitat	Descripció
F_1	95,65	N	Força del pes del braç aplicada a una superfície de 6cm.
F_2	142,4	N	Equivalent a la força de reacció de la molla
T_{1x}	8,609	N·m	Força de torsió creada a l'aplicar la força a una distància de 9cm descentralitzada.
b_1	0,386	m	Distància entre punt d'aplicació de la tensió del cable fins al punt del fulcre.
b_2	0,069	m	Distància entre la subjecció del braç fins al punt de fulcre.

Nota: Longituds, forces i parells actuants en la situació 2.b: amb pes addicional. Font: [Elaboració pròpia]

Diagrama de cos lliure.

Fig. 6.13

Diagrama de cos lliure barra b sense pes addicional



Nota: Diagrama de cos lliure de la barra b, sense tenir en compte els diferents diàmetres de barra i mecanismes de bloqueig telescòpic.

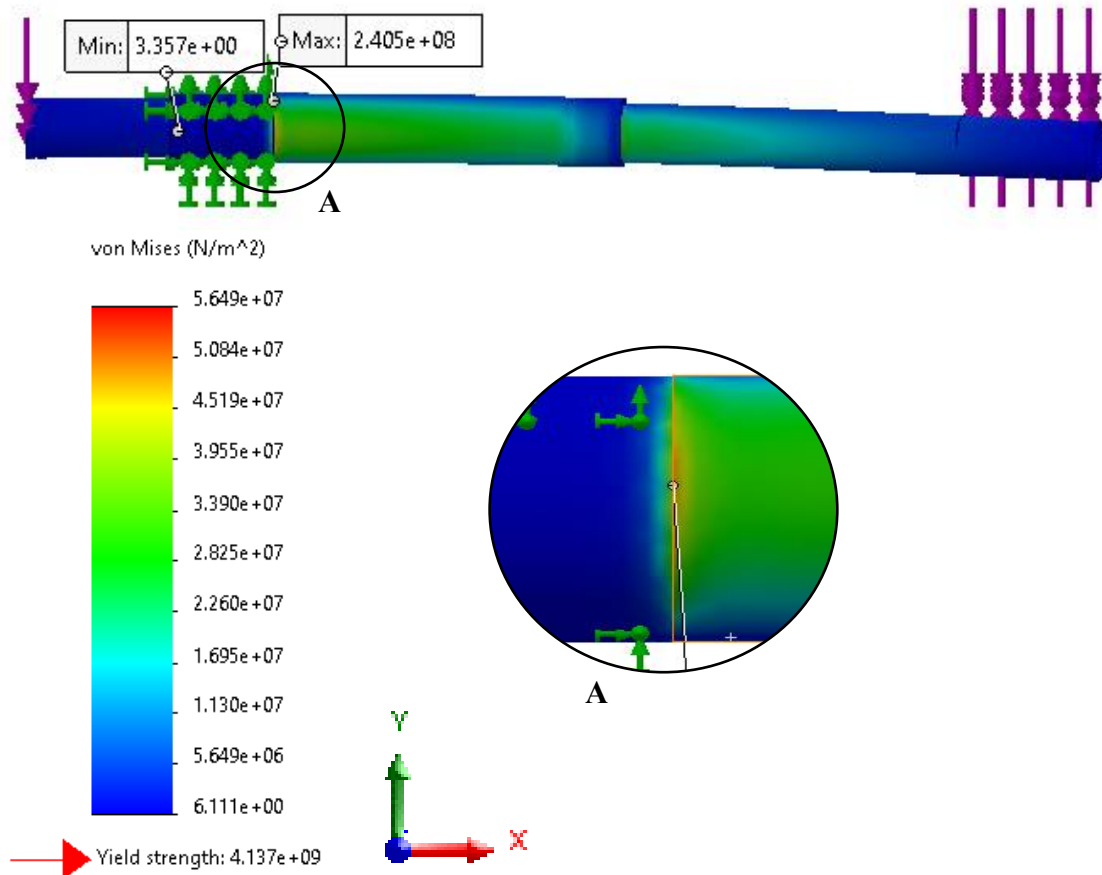
La força F_1 aplica sobre la superfície d'interfície fixe a la barra, aquesta desalineació s'interpreta com a T_{1x} . Per limitacions computacionals, s'ha decidit simplificar el model d'assaig i simular independentment la superfície d'interfície a la barra.

Anàlisi de tensions.

L'anàlisi de tensions realitzat, observat a la Fig. 6.14, mostra la distribució de colors que representen les tensions de Von Mises.

Fig. 6.14

Resultat d'anàlisi de tensions barra b en la situació 1: sense pes addicional



Nota: Figura representativa de les tensions provocades en el conjunt b. La coloració blava representa el valor mínim $6,11\text{N/mm}^2$ i la vermella el valor màxim $5,469 \cdot 10^7\text{N/mm}^2$. Simulació CAD realitzada en SolidWorks. Font [Elaboració pròpia]

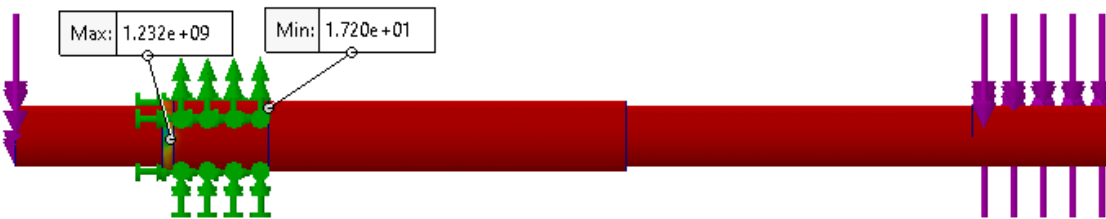
La concentració de tensions en la subjecció, mostra la zona crítica del model.

Factor de seguretat.

Es requereix d'un factor de seguretat mínim comprés entre 2 i 3. Resultant en factor de seguretat 17, el model es triba sobredimensionat per a la situació 2.b.

Fig. 6.15

Resultat de la simulació d'avaluació del factor de seguretat conjunt b en la situació 1: sense pes addicional



Nota: Figura representativa del factor de seguretat FOS en el conjunt b. Simulació CAD realitzada en SolidWorks. Simulació CAD realitzada en SolidWorks. Font [Elaboració pròpia]

Consideracions de les simulacions.

S'observa com l'àrea crítica del model es troba en els punts propers a la zona de subjecció de la barra en el costat més pròxim a la zona d'interferència entre la barra i l'usuari. Aquestes àrees poden ser reforçades o modificar les condicions del contorn. No obstant, el model sota la situació proposada mostra una resistència excessiva a causa del sobredimensionat. L'alt grau de seguretat, de valor 17, indica una alta durabilitat.

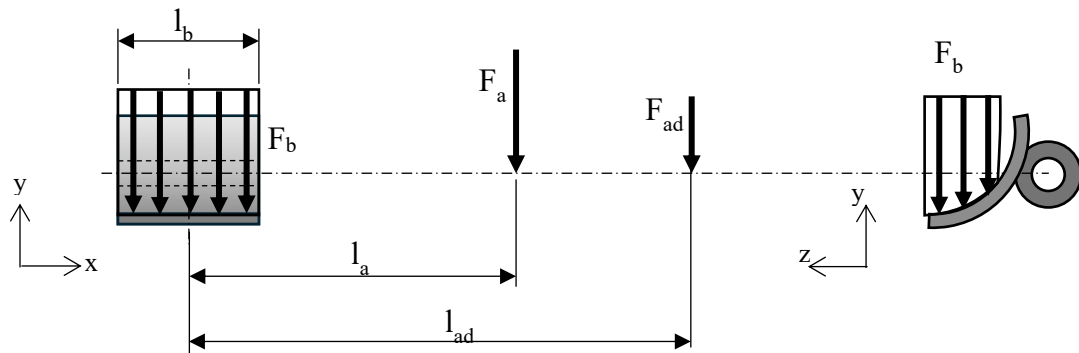
Aquest conjunt de simulacions indiquen la possibilitat d'estudiar el comportament de l'exoesquelet sota càrregues addicionals a les gravitacionals a causa del seu alt rendiment

6.3.1.2. Braçalet de subjecció del braç: Situació 1: parell màxim de compensació.

Diagrama de cos lliure

Fig. 6.16

Carregues i punt d'aplicació en el braçalet de subjecció del braç situació 1 amb pes addicional..

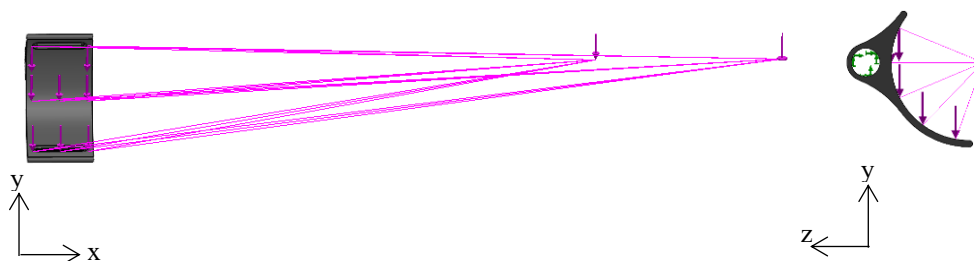


Nota: Diagrama de les forces remotes i directes actuant en la interfície del braç. La força F_{ad} representa la carrega addicional subjectat en la mà de l'usuari en completa extensió. La força F_a representa la càrrega del centre de gravetat del avantbraç quan aquest es troba en completa extensió. La força F_b és el pes aplicat de la secció superior del braç amb el centre de gravetat aplicat directament en el suport. Font: [Elaboració pròpia]

Carregues aplicades en sòlid Works

Fig. 6.17

Carregues aplicades i fixacions en la simulació del braçalet del braç en la Situació :



Nota: Vista frontal i lateral de les carregues aplicades i fixacions en la simulació estàtica SolidWorks per a la situació 1 amb pes addicional. Font:[Elaboració pròpia]

Taula 6.6

Valors utilitzats per a la simulació Situació 1 amb pes addicional.

Paràmetres	Valor	Unitat
F_b	38,45	N
F_a	30,21	N
F_{ad}	0,1	N
l_a	487,78	mm
l_{ad}	657	mm

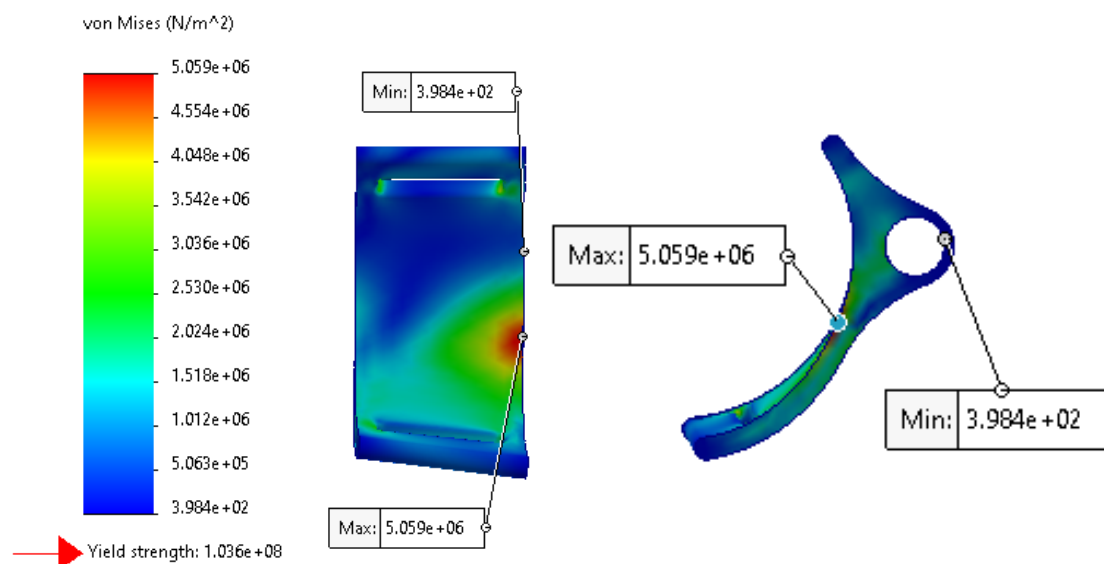
Material	PA tipus 6
----------	------------

Nota: Valors corresponents a un usuari d'alçada 2100mm i pes corporal 185kg. Font: [Elaboració pròpia]

Anàlisi de tensions.

Fig. 6.18

Resultat d'anàlisi de tensions del braç del braç en la situació 1 amb pes addicional.

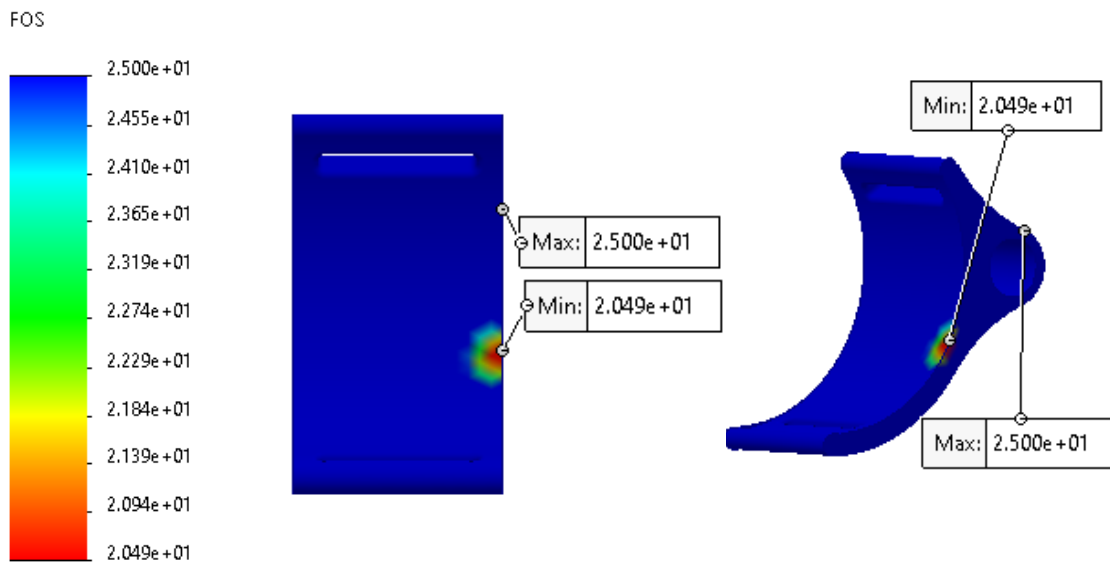


Nota: Figura representativa de les tensions provocades el punt d'interfície del braç. La coloració blava representa el valor mínim $8,436 \cdot 10^2 \text{ N/mm}^2$ i la vermella el valor màxim $1,094 \cdot 10^7 \text{ N/mm}^2$. Simulació CAD realitzada en SolidWorks. Font [Elaboració pròpia]

Factor de seguretat.

Fig. 6.19:

Resultat de la simulació del factor de seguretat de el braçalet del braç en la situació 1: parell màxim de compensació



Nota: Figura representativa del factor de seguretat FOS en l'element d'interfície del braç. Factor de seguretat màxim presentat en el component $1,229 \cdot 10^5$ i mínim 9,478. Simulació CAD realitzada en SolidWorks. Font [Elaboració pròpia]

Consideracions de les simulacions.

Es conclou que l'element és capaç de resistir la situació 1 amb pes addicional estudiades les tensions Von Mises no superen el límit elàstic del material. Tant mateix, presenta un al grau de seguretat, indispensable per al component de interfície amb l'usuari.

6.3.2. Conjunt a.

6.3.2.1. Anàlisi de pandeig – Componentes de carbofibra

S'ha observat com la càrrega màxima vertical a la qual es sol·licita el model en equilibri es produeix amb el model L/XL amb la longitud mínima d'actuació equivalent a 178mm del punt de fulcre. Amb aquesta configuració es permetent l'aplicació directa sobre la subjecció una càrrega de 185,6N amb l'avantatge mecànic màxima del mecanisme. Conseqüentment la barra *a* es troba sota la càrrega de 185,6N, més la força de compensació de la molla, igual a 284,8N del model L/XL.

Fig. 6.20

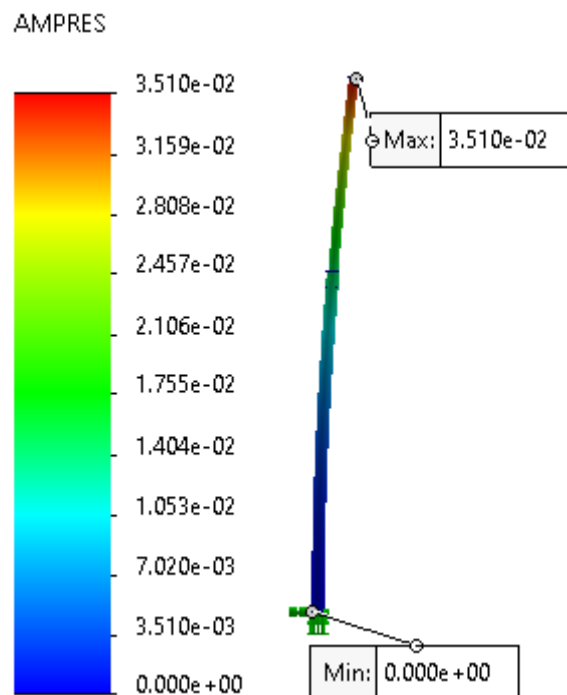
Forçes i subjeccions aplicades en el "Conjunt a" simulació de pandeig



Nota: Configuració de subjeccions (fletxes verdes) i forces (fletxes morades) per a la simulació de pandeig. Font: [Elaboració pròpia]

Fig. 6.21

Primer resultat de l'anàlisi de pandeig en el conjunt a



Nota: Deformació degut a la compressió del conjunt a, escala 2,5661. Font: [Elaboració pròpia]

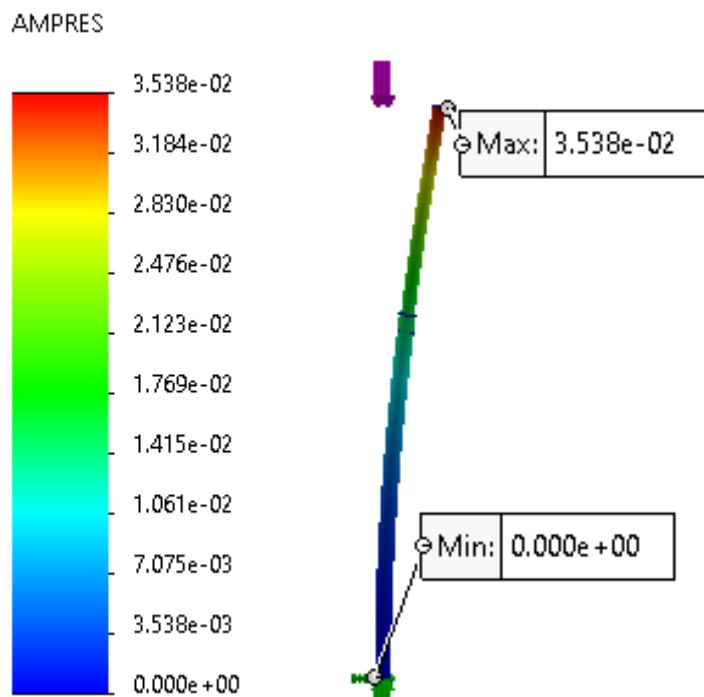
El factor de seguretat o carrega obtingut es equivalent a 2,23., indicant una capacitat del 0,641 d'increment de la carrega de valor 470,4N.

En vista d'aquest factor, s'opta per el redimensionat del conjunt. Es valora augmentar la inèrcia de la secció mitjançant l'augment del diàmetre, no de l'espessor.

S'ha escollit el diàmetre segons el catàleg estandarditzat de l'empresa Carbon Fiber Tubes [26].

Fig. 6.22

Segon resultat de l'anàlisi de pandeig en el conjunt a



Nota: Pandeig patit en el conjunt a sota una força compresora equivalent a 470,4N. Deformada a escala 2,12864. Font: [Elaboració propia]

Al augmentar els respectius diàmetres de 10 i 14 a 14 i 18, trobem un augment del 59% del factor de seguretat. Resultant en un factor de 4,4516.

6.3.3. Conjunt z.

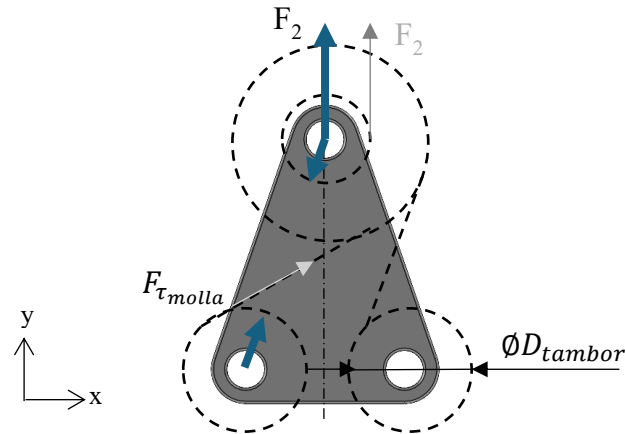
6.3.3.1. Placa de suport sota les condicions del Model L/XL.

La funció del element d'estudi consisteix en el suport del eixos de rotació del tambor de magatzem i conductor del parell. Les forces aplicades en els punts de connexió es mostren en la Taula 6.7.

Diagrama de cos lliure

Fig. 6.23:

Carregues i punt d'aplicació en l'element la placa de subjecció en el model L/XL.



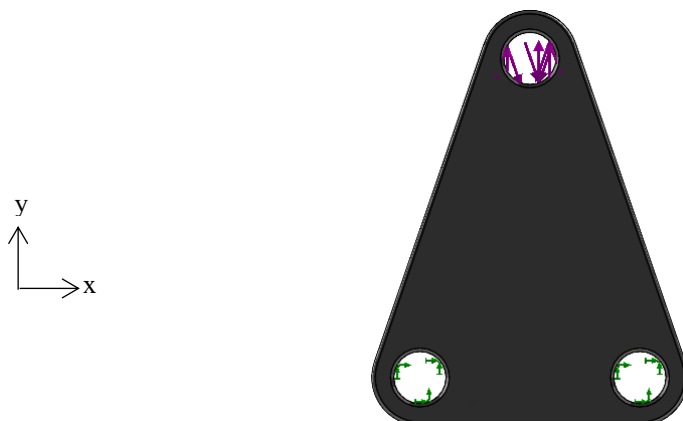
Nota: Diagrama de les forces remotes en l'element de la placa de subjecció de les molles. La força $F_{\tau_{molla}}$ és la força tensora de la molla entre tambors. La força F_2 és la aplicada per el cable tensor. Font: [Elaboració pròpia]

No es tenen en compte moments tensionals, la unió entre elements permet la rotació entre ells, només s'apliquen carregues axials i normals.

Càrregues aplicades en Solid Works

Fig. 6.24

Càrregues aplicades i fixacions en la placa de subjecció en el model L/XL



Nota: Vista de les càrregues aplicades i fixacions en la simulació estàtica SolidWorks per a la situació 2.b on s'aplica el parell màxim del sistema. Font: [Elaboració pròpia]

La fixació de la simulació ha sigut determinada com a rodament, permetent la rotació del component a estudiar.

Les càrregues aplicades corresponent a la Situació 2.b en un usuari de 2100mm i un pes 140kg.

Càlculs i paràmetres de simulació

$$F_{\tau_{molla}} = \frac{\phi_{tambor\ em}}{2} \cdot \tau_{molla_{L/XL}} \quad (\text{VIII.})$$

$$F_{\tau_{molla}} = \frac{45\text{mm}}{2} \cdot 2848\text{N} \cdot \text{mm}$$

$$F_{\tau_{molla}} = 63,288$$

Taula 6.7

Valors utilitzats per a la simulació del la placa de subjecció en el mode XL/L

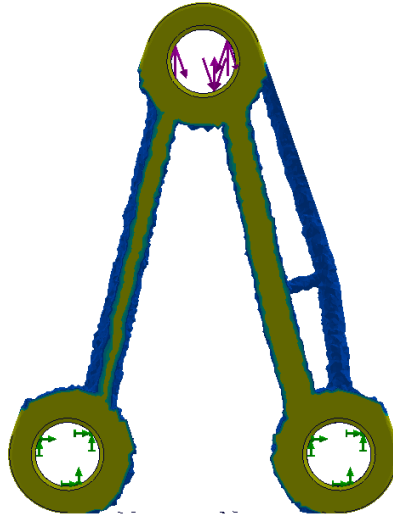
Paràmetres	Valor	Unitat
$F_{\tau_{molla}}$	63,288	N
$F_{1S/M}$	142,4	N
Material	PA tipus 6	

Font: [Elaboració pròpia]

Anàlisi topològic

Fig. 6.25

Anàlisi topològic placa de subjecció.

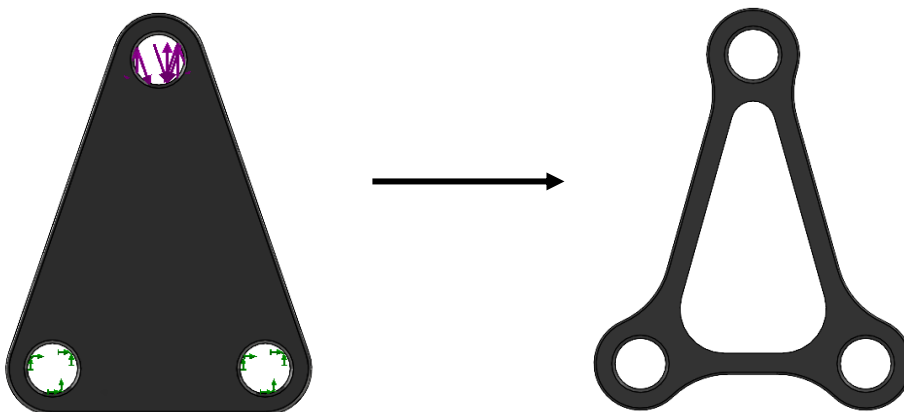


Nota: Anàlisi topològic sota les forces F_1 i $F_{\tau_{molla}}$. Reducció de la massa un 10%, amb preservació de 5mm en els punts de fixació i de carrega i limitació del factor de seguretat a valor 3.

En base al resultat observat del anàlisi topològic s'ha valorat un redisseny del model amb la finalitat de reduir el pes en el sumatori del conjunt.

Fig. 6.26

Redisseny del component de suport de les molles.



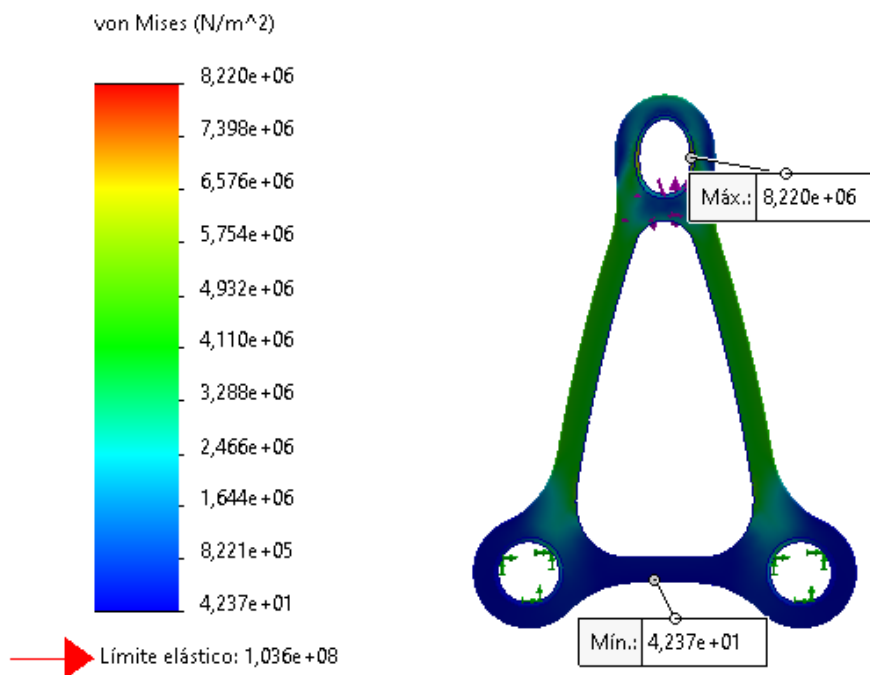
Nota: proposat de redissenyen de la placa de suport del es molles en base al anàlisi topogràfic realitzat. Font:[Elaboració pròpia]

S'ha decidit percebre la component horitzontal per a resistir focces externes no previstes i fermentar la vida útil del material.

Anàlisi de tensions.

Fig. 6.27

Resultat de les tensions von Mises per a la simulació del la placa de subjecció en el model L/XL

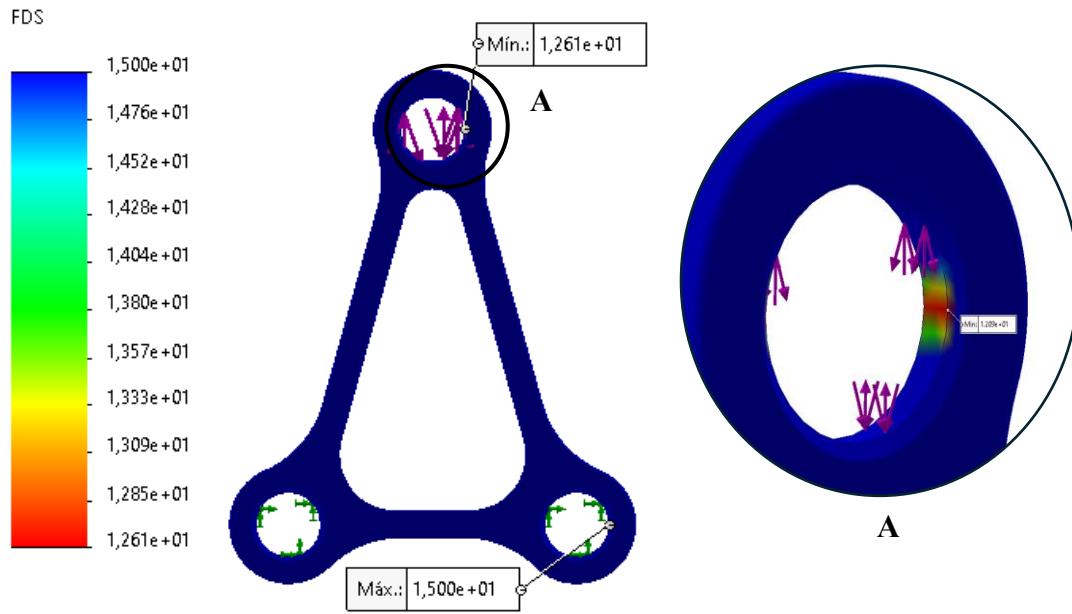


Nota: Figura representativa de les tensions provocades en la placa de subjecció del eixos de rotació de les molles. La coloració blava representa el valor mínim $4,237 \cdot 10^1$ N/mm² i la vermella el valor màxim $8,220 \cdot 10^6$ N/mm². Simulació CAD realitzada en SolidWorks. Font [Elaboració pròpia]

Factor de seguretat.

Fig. 6.28:

Resultat de la simulació del factor de seguretat de la placa de subjecció de les molles en el model L/XL



Nota: Figura representativa del factor de seguretat FOS en la placa de suport de les molles. Factor de seguretat i mínim ≈ 13 Per facilitar la visualització de parts crítiques s'ha limitat el FOS màxim a 15. Simulació CAD realitzada en SolidWorks. Font [Elaboració pròpia]

Consideracions de la simulació.

El model proposat en basat en l'anàlisi topològic presenta un bon rendiment sota les carregues sol·licitades. Degut a les forces d'actuació són relativament baixes respecte al límit elàstic de Nylon, tot i presentar una reducció dràstica de la mesa, l'elmet mostra una alta resistència.

7. Disseny final.

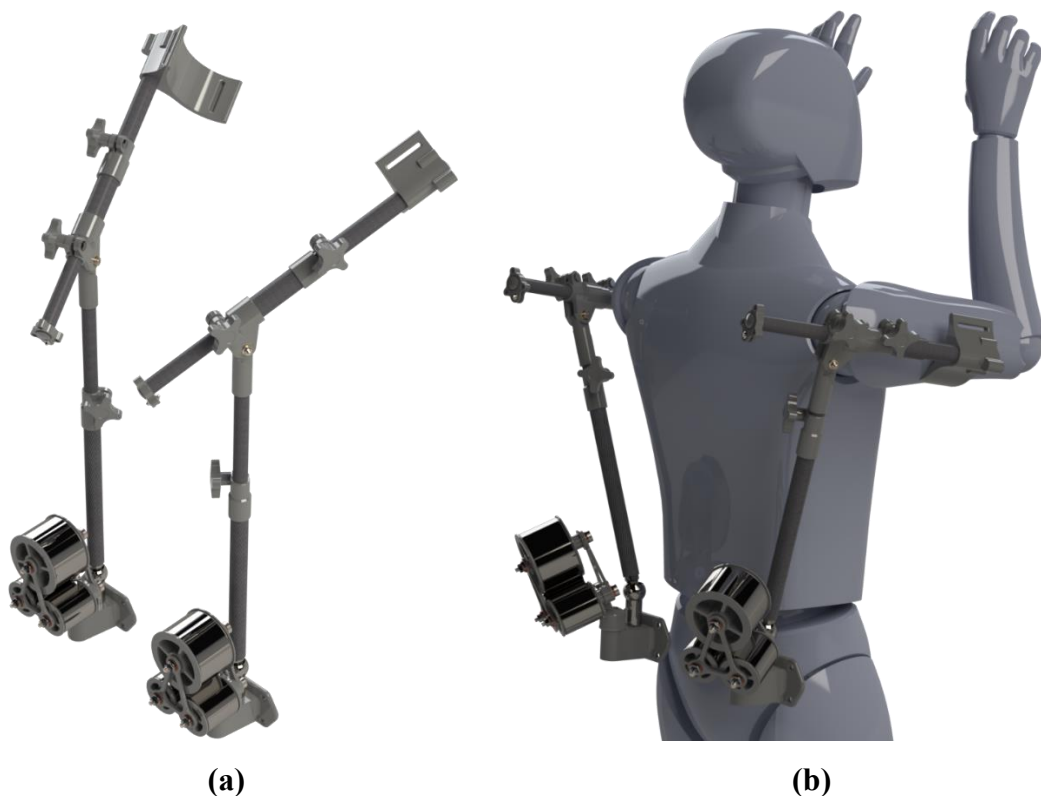
L'última versió definida en el projecte s'ha nomenat EXOumerus, nom derivat del terme grec 'umerus', aquest es tradueix al català com a espatlla.

Aquest model incorpora un total de 4DoF, tres en l'articulació A i dos en l'articulació B. Cada braç, tant esquerra com dret ve equipat amb tres mecanismes d'ajust telescòpic que permeten una personalització detallada segons les necessitats de l'usuari.

En termes de pes, el model de tallatge S/M presenta un pes total equivalent a 3,7kg sense valorar el pes de l'arnès, mentre que el model L/XL presenta un pes de 3,86kg.

Fig. 7.1

Disseny estructural del mecanisme d'assistència EXOumerus.



Nota: Disseny final del mecanisme d'assistència EXOumerus, (a) muntatge de braç dret i braç esquerre (b) Model incorporat en un model antropomètric. Font: [Elaboració pròpia]

Adaptació i escalabilitat

El model ha estat dissenyat per admetre futures implementacions modulars futures. Aquest disposa de tres femelles de llautó M6 per a la integració de mòduls en el disseny. Aquesta característica assegura la capacitat d'adaptació i escalabilitat de l'EXOumerus. Els dos punts de fixació es troben en la Fig. 7.2 a i b, adaptades a l'element 'Abraçadora d'interconnexió b i z' i el 'braçalet de subjecció'.

Fig. 7.2

Punts de fixació de les futures implementacions modulars.



Nota: Punts de fixació mitjançant rosques mètriques sis, per a la incorporació de mòduls. (a) Fixacions en 'Abraçadora d'interconnexió b i z'. (b) Fixacions en el 'braçalet de subjecció'.

Regulació telescòpica

La incorporació dels mecanismes de regulació telescòpica així com les abraçadores de bloqueig per compressió per rosca axial, tenen la finalitat de garantir l'adaptació de les diferents proporcions corporals per a alçades compreses entre 2,2 i 1,4 m.

Taula 7.1*Longituds totals i rangs de regulació de longitud de les barres*

Longituds	a	b_1	b_2
Longitud total	476-714	178-267	24,5-166
Rang de regulació	272	226	141,5

Nota: Longituds totals i diferencials de les barres del model EXOumerus a i b , i longitud de les barres de l'agregació modular de l'avantbraç c i d en mm.

El mecanisme de bloqueig de coll dividit rosca axial, ha sigut seleccionat per les seves capacitats de resistir forces de torsió, axials i ajust de la força de l'abraçadora. Mitjançant l'ús de resina epòxid facilita un ràpid i senzill assemblatge. Addicionalment, proporciona una gran facilitat d'ús l'usuari, així com una regulació personalitzada dins dels rangs observats a la Taula 7.1

7.1. Propietats mecàniques dels materials estructurals seleccionats.

7.1.1. Fibra de Carboni T1700 K12.

Les propietats funcionals i mecàniques del material han estat extretes de la pàgina web del fabricant [48], així com l'estudi experimental realitzat per H.Rahmani et al. (2015) [49] i la fitxa tècnica proporcionada per Jinjiuyi Carbon Fiber Team [50]. Degut al seu comportament ortotròpic, s'han considerat les seves propietats independents en els tres plans de treball.

Taula 7.2

Propietats de la matriu de fibra de carboni T700-12-k amb base de resina epòxid Araldite LY-5052.

Propietat	Valor	Unitat
Mòdul Elàstic en X	99.170	N/mm ²
Mòdul Elàstic en Y	58.210	N/mm ²
Mòdul Elàstic en Z	58.210	N/mm ²

Coeficient de Poisson	0.08	-
Mòdul de cisalla	4,18	N/mm ²
Densitat de massa	1.800	kg/m ³
Resistència a la tracció	1200	N/mm ²
Resistència a la compressió	4900	N/mm ²
Resistència de cisalla XY	40	N/mm ²
Límit elàstic	1200	N/mm ²
Conductivitat tèrmica	40,1664	W/(m·K)

Nota: Propietats mecàniques i funcionals de la matriu de fibra de carboni ortotròpic T700-12-k amb base de resina epòxid Araldite LY-5052 i enduridor d'amina HY-5052. Amb composició de tres fibres d'amplada 0,135 amb orientació 0°,90° i 0°. Font: [Elaboració pròpia]

No s'han trobat els valors de resistència de tracció, compressió, cisalla en els eixos Y i Z. Només s'ha trobat el valor del coeficient de Poission en el pla XY. Enfront d'aquesta informació, s'ha aplicat els valors de resistència a la tracció, compressió i cisalla de l'eix X als eixos Y i Z, així com el coeficient de Poisson del pla YX aplicat al pla YZ i XZ.

7.1.2. Nylon 6 (PA Tipus 6).

Les propietats utilitzades per a l'anàlisi d'elements finits del polímer Nylon 6 són corresponents a les propietats per defecte de SolidWorks. Aquestes, han sigut prèviament contrastades amb la base de dades MatWeb [51].

Taula 7.3

Propietats mecàniques del Nylon 6.

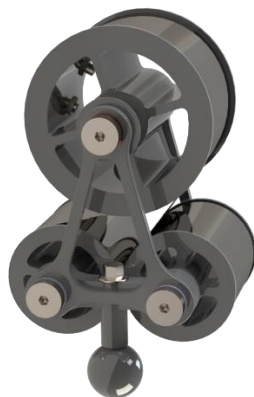
Propietat	Valor	Unitat
Mòdul Elàstic	2620	N/mm ²
Coefficient de Poisson	0.34	-
Mòdul de cisalla	970,4	N/mm ²
Densitat de massa	1120	kg/m ³
Resistència a la tracció	90	N/mm ²
Límit elàstic	103,648886	N/mm ²
Conductivitat tèrmica	0,233	W/(m·K)
Calor específica	1601	J/(kg·K)

Nota: Propietats mecàniques i funcionals de Nylon tipus 6. Font: [Elaboració pròpia]

7.2. Conjunt z.

Fig. 7.3: Vista isomètrica del renderitzat del conjunt z

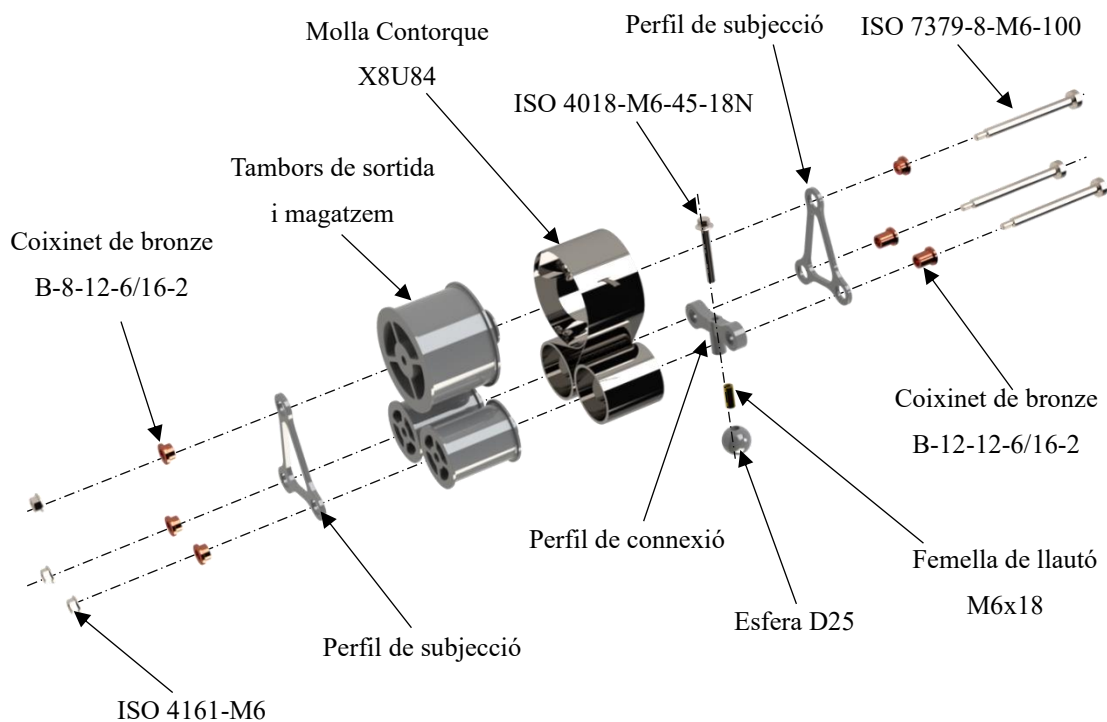
Vista isomètrica del renderitzat del conjunt z



Nota: Vista isomètrica del model 3D renderitzat del conjunt z Font:[Elaboració pròpia]

Fig. 7.4

Vista d'especejament del conjunt z.



Nota: Vista d'especejament indicativa dels components que componen el conjunt z del model EXOumerus. Font: [Elaboració pròpia]

Taula 7.4*Pes individual i total dels components del conjunt b.*

Nom de l'element	Quantitat	Pes (g)
Perfil de subjecció	2	7,42
Perfil de connexió	1	11,54
Molla ContorqueX8U84	1	376,35
Tambors de sortida i magatzem	1	360,62
Esfera D25	1	8,02
Fem ConTorqueella de llautóM6x18	1	4,87
Coixinet de bronze B-8-12-6/16-2	4	6,37
Coixinet de bronze B-12-12-6/16-2	2	10,84
ISO 4161-M6	3	3,79
ISO 7379-8-M6-100	3	46,5
ISO 4161-M6-45-18N	1	1,77
Cable d'acer	1	29,95
ISO 4035 M5 N	2	0,88
ISO 14581 M5x12x12 N	2	2,28
Total:		982,31

Nota: Pes dels components del conjunt z en g, les seves quantitats i el pes total del conjunt.

Font: [Elaboració pròpia]

7.2.1. Disseny de la molla de parell constant.

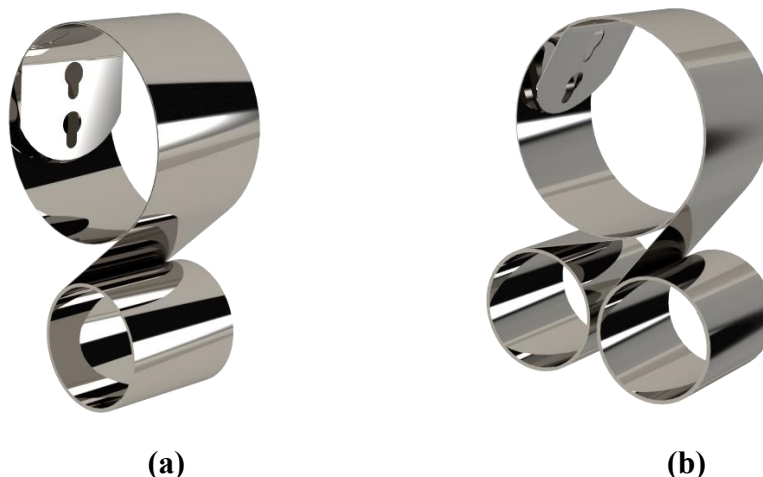
Configuració de la molla i rendiment.

S'ha seleccionat una configuració de tambors inversa, mostrada en la Fig. 7.5. Aquesta permet la generació del parell constant al resistir la flexió de la molla al voltant del tambor de sortida de manera inversa. Mostra una torsió constant d' $1,424 \text{ N}\cdot\text{m} \pm 0,142$ amb un pretensat mínim de 1,5 voltes del tambor de sortida. Aquesta configuració garanteix la qualitat constant del parell subministrat per la molla durant la seva operació.

Per assegurar una transmissió eficient del parell a través de la molla de torsió constant, s'ha considerat la implementació d'una segona gola en el tambor de transmissió de diàmetre 20mm. Aquesta segona gola permet la incorporació del cable d'acer per a la transmissió del parell, amb la finalitat de convertir la torsió en una força lineal. La selecció dimensional està dissenyada per equilibrar de manera eficient la força de torsió aplicada amb la capacitat de control i maniobra del dispositiu. Aquesta selecció garanteix que la força generada per la molla sigui adequadament transferida, optimitzant l'eficàcia del sistema.

Fig. 7.5

Configuració de les molles de parell constant en els models S/M i L/XL



Nota: Dues configuracions de les molles. (a) Molla de parell constant per al model S/M amb valor $1424 \text{ N}\cdot\text{mm}$. (b) Molles de parell constant per la model L/XL MB valor $2848 \text{ N}\cdot\text{m}$. Renderitzat CAD realitzat en SolidWorks. Font [Elaboració pròpia]

Durabilitat.

Segons les especificacions proporcionades per Vulcan Spring, la vida útil de la molla seleccionada és d'aproximadament 12.000 cicles. Considerant un any laboral típic a Espanya, consta de 243 dies laborals (sense comptabilitzar, 14 per festius nacionals i regionals, 30 dies de vacances i 78 dies del dia i mig de descans estipulat per l'Estatut del Treballador). S'estima que la molla permetrà aproximadament 49,38 cicles per dia laboral abans de presentar una degradació crítica.

Partint que un any, no de traspàs, consta de 365 dies, resant: marcats per llei; (Estatut del treballador a Espanya). Obtenim un resultat de 243 deis laborals. Teoritzant que l'EXO es troba sota un ús diari, aquesta permet 49,38 cicles per dia de treball abans de la degradació efectiva crítica de la molla.

Manteniment.

Davant d'aquestes circumstàncies s'ha optat per incorporar un encaix tipus 12 en el catàleg de Vulca Springs, el qual permet el seu recanvi sense necessitar l'ús d'eines. Aquest disseny facilita el manteniment periòdic i assegura que els usuaris sense qualificació tècnica específica puguin realitzar-ho, reduint així el temps i cost associat al servei tècnic

7.2.2. Disseny dels tambors.

Seguint les especificacions recomanades pell fabricant [45], es defineix les dimensions dels tambors involucrats en el mecanisme de transmissió. El tambor d'emmagatzematge, que allotja la molla té un diàmetre de 45mm. El tambor de transmissió del parell presenta un diàmetre de 78,2mm, facilitant la distribució uniforme del parell al llarg de tot el sistema.

El disseny i selecció del tambor ha sigut basat en les solucions proposades per l'empresa Vulcan spring. No obstant s'ha optat per al disseny personalitzat dels tambors, a causa de les limitacions estandarditzades de l'empresa.

Fig. 7.6

Tambor de transmissió del parell.



Nota: Vistes isomètriques del renderitzat SD del model de tambor de transmissió.

Font:[Elaboració pròpia]

7.2.3. Disseny del cable.

El cable tensor d'acer inoxidable desenvolupa un paper crucial en la transmissió del parell, aquest permet la interconnexió entre el conjunt *b* i el conjunt *z*. Encarregat de transmetre la moció rotativa del braç per a la tensió de la molla.

El disseny del cable de diàmetre 2mm i longitud mínima de 1154mm, disposa de dos punts de fixació. La selecció del diàmetre òptim ha estat calculat en el apartar 6.2.7, amb factor de seguretat 5.

Fig. 7.7

Cable tensor d'acer inoxidable D2x1154.



Nota: Model 3D renderitzat del cable tensor en repòs sobre ell mateix. Font:[Elaboració pròpia]

L'ancoratge en el conjunt *b*, permet la modificació de la compressió de bloqueig així com la retirada del bloqueig de retenció del cable. Es compon d'un arc d'acer que perfila l'arc i

permet ser posicionat sobre un eix sense d'una manera segura sense perjudicar els components durant la moció.

Fig. 7.8

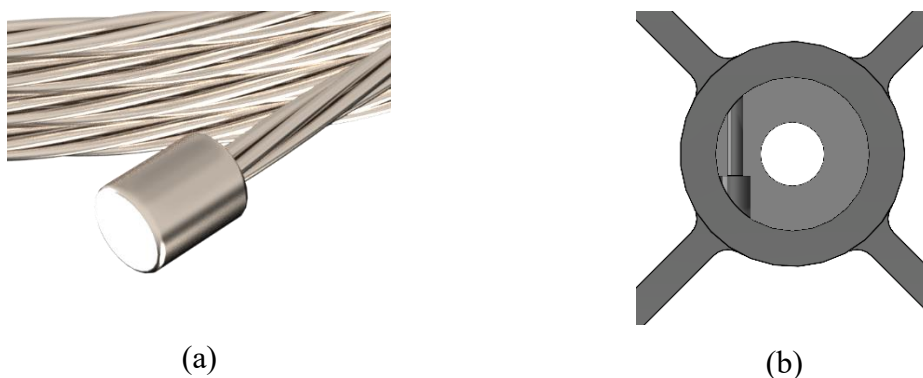
Fixació del cable tensor en el conjunt b



Nota: Model 3D renderitzat del cable tensor en repòs sobre ell mateix. (a) Cable tensor amb mecanisme de bloqueig i arc de forma. (b) Cable tensor fixat en el model. Font:[*Elaboració pròpia*]

La fixació en el conjunt z consta d'un gruix fixat a la punta del cable, permetent el seu muntatge en el tambor de transmissió del parell mitjançant el lliscat del cable sencer fins a encaixar el gruix en el forat de fixació del tambor. Aquest sistema de fixació assegura que el cable no es desprengui de la seva fixació i sigui necessària el espejament de l'extrem oposat per a la seva retirada.

Fig. 7.9 Fixació en el conjunt z.



Nota: (a) Model 3D renderitzat del gruix d'ancoratge. (b) vista seccionada del tambor de transmissió, punt d'ancoratge de el cable tensor. Font: [*Elaboració pròpia*]

7.3. Conjunt b.

El conjunt b té la funció de palanca, on s'apliquen les dos forces creant moments inversos. És considerat com un dels components més crítics del sistema. Aquest disposa d'1 DoF.

Fig. 7.10

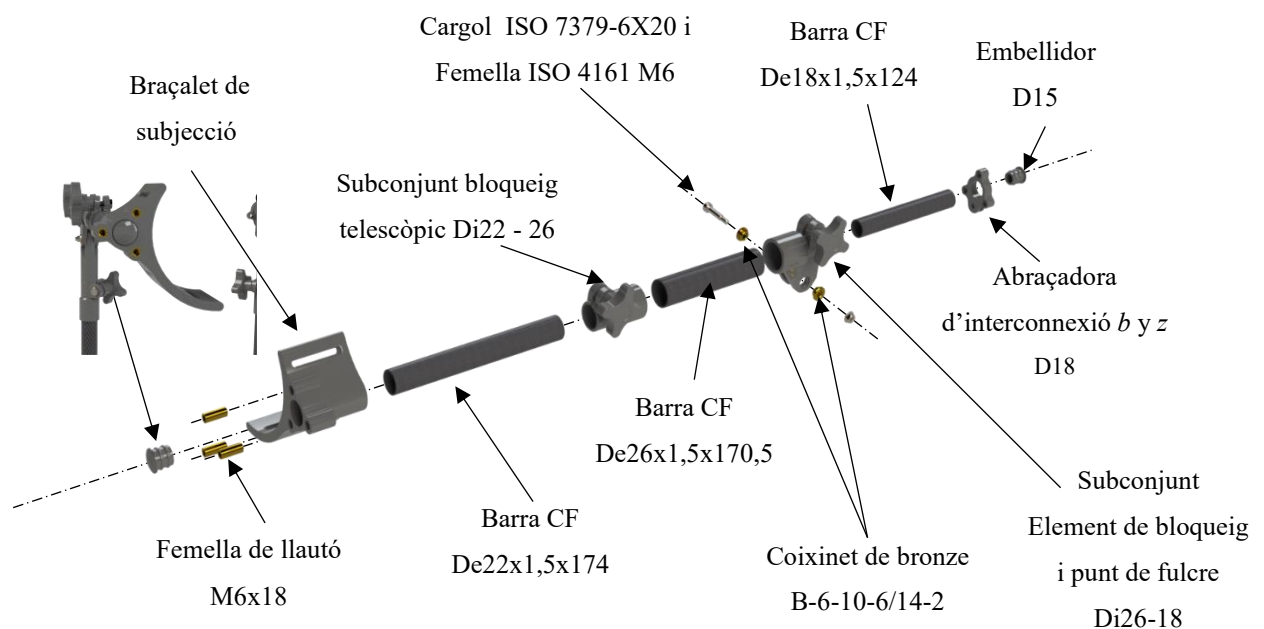
Imatge renderitzada del conjunt b



Nota: Vista isomètrica del model 3D renderitzat del conjunt b. Font: [Elaboració pròpia]

Fig. 7.11

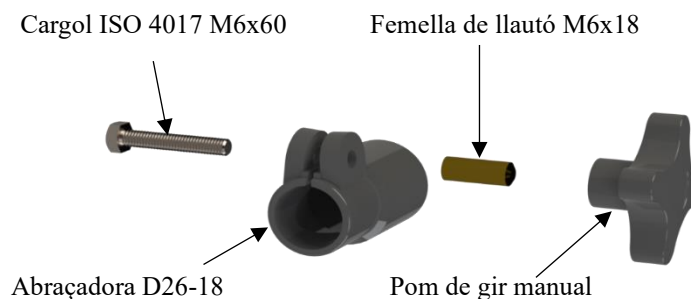
Vista d'especejament del conjunt b.



Nota: Vista d'especejament indicativa dels components que componen el conjunt b del model EXOumerus. Font: [Elaboració pròpia]

Fig. 7.12

Vista d'especejament del subconjunt de bloqueig telescòpic.



Nota: Vista d'especejament indicativa dels components que componen el subconjunt de bloqueig telescòpic del model EXOumerus. Font: [Elaboració pròpia]

Taula 7.5

Pes individual i total dels components del conjunt b.

Nom de l'element	Quantitat	Pes (g)
Embellidor D18	1	2,41
Embellidor D15	1	1,82
Braçalet de subjecció	1	120,49
Barra CF De22x1,5x174	1	30,26
Barra CF De26x1,5x170,5	1	23,79
Barra CF De18x1,5x124	1	17,35
Cargol ISO 4017 M6x60	2	9,65
Abraçadora D26-18	2	15,82
Pom de gir manual	2	13,59
Subconjunt element de bloqueig i punt de fulcre Di26-18	1	32,39
Abraçadora d'interconnexió b y z D18	1	6,04

Cargol ISO 7379-6X20	1	8,44
Femella ISO 4161 M6	1	2,13
Femella de llautó M6x18	5	5,49
Coixinet de bronze B-6-10-6/14-2	2	1,05
Total:		352,79

Nota: Pes dels components del conjunt b en g, les seves quantitats i el pes total del conjunt.

Font: [Elaboració pròpia]

7.4. Conjunt a.

Fig. 7.13: Vista isomètrica del renderitzat del conjunt a.

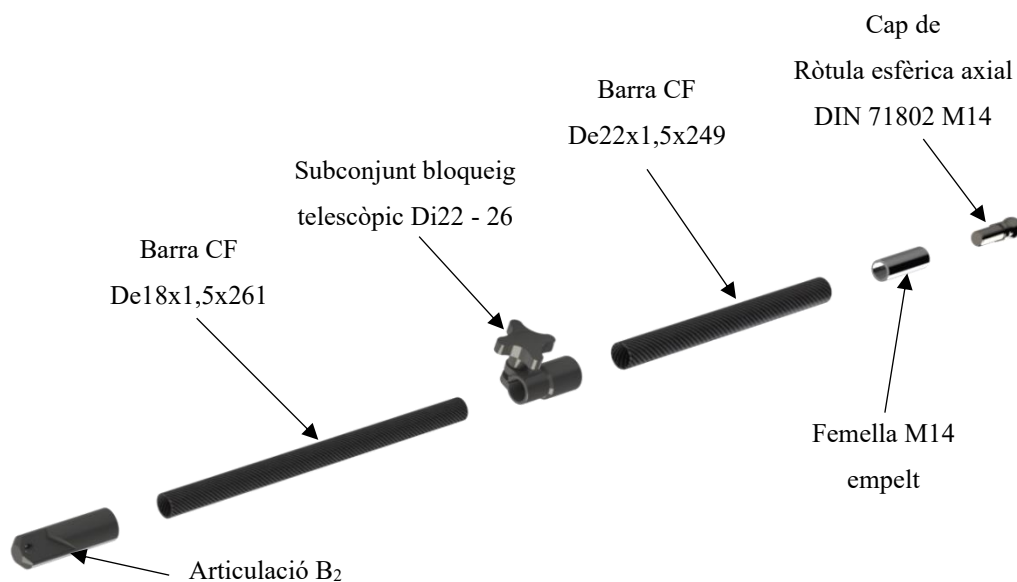
Vista isomètrica del renderitzat del conjunt a.



Nota: Vista isomètrica del model 3D renderitzat del conjunt a. Font:[Elaboració pròpia]

Fig. 7.14

Vista d'especejament del conjunt a.



Nota: Vista d'especejament indicativa dels components que componen el conjunt *b* del model EXOumerus. Font: [Elaboració pròpia]

Taula 7.6

Pes individual i total dels components del conjunt a.

Nom de l'element	Quantitat	Pes (g)
Barra CF De22x1,5x249	1	36,54
Barra CF De18x1,5x261	1	43,3
Cap de Ròtula esfèrica axial DIN 71802 M14	1	78,4
Pom de gir manual	1	13,59
Femella M14 empelt	1	16,19
Femella de llautó M6x18	1	5,49
Cargol ISO 4017 M6x60	1	9,65
Articulació B ₂	1	16,81
Total:		224,87

Nota: Pes dels components del conjunt a en grams, les seves quantitats i el pes total del conjunt. Font: [Elaboració pròpia]

7.5. Conjunt d'interfície amb el maluc.

Fig. 7.15

Vista isomètrica del renderitzat del conjunt d'interfície amb el maluc

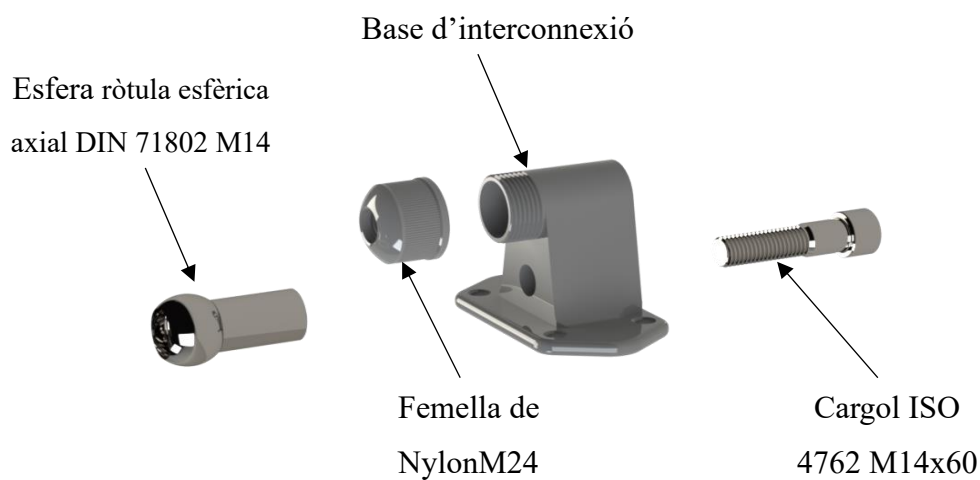


Nota: Vista isomètrica del model 3D renderitzat del conjunt d'interfície amb el maluc.

Font:[Elaboració pròpia]

Fig. 7.16

Vista d'especejament del conjunt d'interfície amb el maluc.



Nota: Vista d'especejament indicativa dels components que componen el conjunt d'interconnexió amb el maluc del model EXOumerus. Font: [Elaboració pròpia]

Taula 7.7

Pes individual i total dels components del conjunt d'interfície..

Nom de l'element	Quantitat	Pes (g)
Esfera ròtula axial DIN 71802 M14	1	127,44
Femella de NylonM24	1	11,51
Base d'interconnexió	1	134,37
Cargol ISO 4762 M14x60	1	98,88
Total:		1.522,2

Nota: Pes dels components del conjunt a en grams, les seves quantitats i el pes total del conjunt. Font: [Elaboració pròpia]

7.6. Arnès.

El disseny de l'arnès s'ha basat i inspirat en l'anatomia utilitzada en les motxilles de muntanya de gran capacitat, les quals estan especialment adaptades per afrontar condicions adverses, com el muntanyisme o els esports d'alta exigència. S'ha arribat a la conclusió que, avui en dia, el camp de les motxilles està considerablement més desenvolupat i estudiat que el de les noves tecnologies d'exoesquelets. Les motxilles modernes han evolucionat cap a les solucions òptimes comercialitzades d'avui en dia, les quals proporcionen un equilibri entre resistència mecànica, transpirabilitat i comoditat.

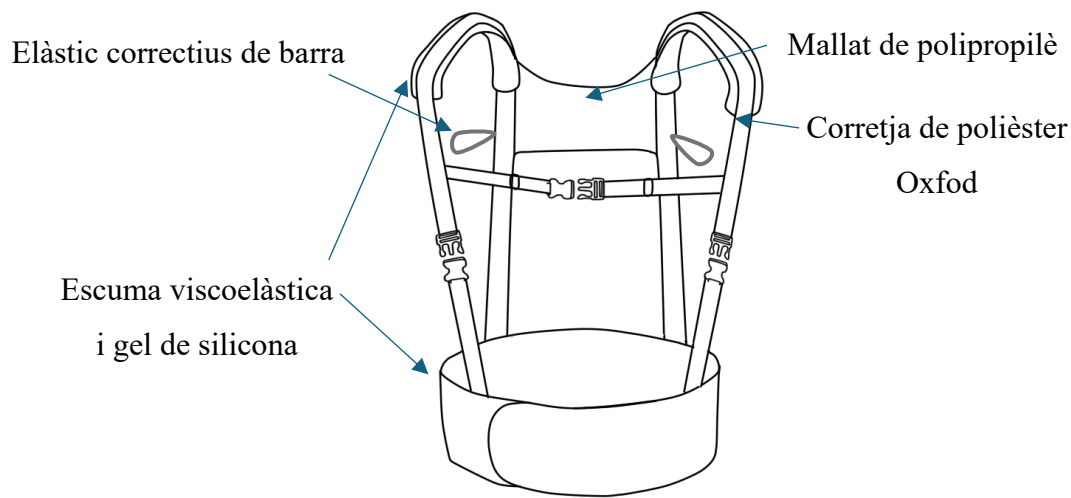
Els objectius d'una motxilla d'altres càrregues són similars als objectius precisats pel disseny de l'arnès de subjecció del projecte. Aquest són:

- Mitigació de la càrrega de subjecció en àmplies zones de suport per a la maximització del confort.
- Transpirabilitat dels materials per a zones en contacte amb la pell.
- Resistència a l'abració i fatiga per a garantir l'estabilitat del model durant ús prolongat i diari.
- Capacitat de càrrega.
- Ergonomia i ajustat personalitzat per facilitar l'adaptació a diverses mides caporals.

El disseny de l'arnès ha sigut basat en els dissenys existents en diferents dispositius d'aixecament de càrregues, com venen a ser arnesos de treball per a la manipulació de càrregues [51] o motxilles militars o capacitades per portar altes càrregues [53] i [54]. Mitjançant l'ús d'aquest model existent es garanteix l'ergonomia del disseny.

Fig. 7.17

Disseny inicial de l'arnès tou pel suport de l'exoesquelet



Nota: Disseny inicial de l'arnès tou pel suport de l'exoesquelet. Font: [Elaboració pròpia]

El cinturó lumbar cobreix idealment la zona lumbar i el maluc. Mitjançant una lamina de polipropilè al voltant de les escumes es permet la fixació del model en la zona posterior.

Taula 7.8

Mesures del cinturó lumbar

<i>Talles</i>	<i>Perímetre</i>	<i>Longitud</i>	<i>Amplada</i>
<i>Mesures (cm)</i>			
<i>S/M</i>	<i>60-100</i>	<i>100</i>	<i>19</i>
<i>L/XL</i>	<i>90-140</i>	<i>140</i>	<i>19</i>

Nota: Rang de mesures d'ajustatge per a l'adaptació dels diferents usuaris. Font: [Elaboració pròpia].

8. Validació final del model.

8.1. Càlcul del perfil de compensació del parell.

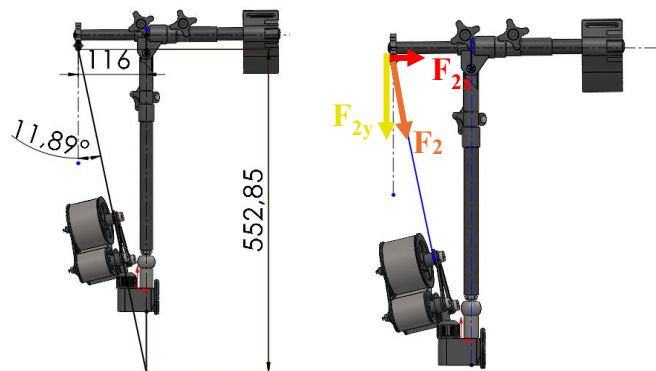
El disseny final del EXOumerus mostra diferències amb la idealitat inicialment plantejada durant la transmissió del parell. Un cop modelitzat, es determinen dos factors que poden afectar el comportament del perfil del parell d'assistència. Els factors trobat són:

- La F_2 de la molla no mostra un comportament purament vertical constant durant la rotació del braç.
- El mateix pes del model (conjunt b i z) són factors prèviament no valorats.

8.2.1. Variació de F_2 degut a la variació angular.

Fig. 8.1

Angle d'inclinació del cable tensor amb $l_{a \min}$ i $l_{b \max}$.



Nota: Angle d'inclinació del cable tensor de valor 11,85deg amb $l_{a \min}=476\text{mm}$ i $l_{b \max}=116\text{mm}$ a 90deg. Font:[Elaboració pròpia]

La força F_2 es deriva en dues components, F_{2x} i F_{2y} . La component F_{2y} realitza la compensació gravitacional, mentre la component F_{2x} crea una força horitzontal en el sistema mitigada per la subjecció elàstica de la barra a .

$$F_{2y} = F_2 \cdot \cos(11,85) \quad (9.1)$$

$$F_{2x} = F_2 \cdot \sin(11,85) \quad (9.2)$$

Model S/M (9.1)

$$F_{2y} = 142,4N \cdot \cos(11,85) \rightarrow F_{2y} = 139,36N \quad (9.2)$$

$$F_{2x} = 142,4N \cdot \sin(11,85) \rightarrow F_{2x} = 29,12$$

Model L/XL (9.1)

$$F_{2y} = 284,8N \cdot \cos(11,85) \rightarrow F_{2y} = 278,73N \quad (9.2)$$

$$F_{2x} = 284,8N \cdot \sin(11,85) \rightarrow F_{2x} = 58,48N$$

L'equació del parell transmès és:

$$\tau_{\alpha=0^\circ \geq \alpha \geq -90^\circ} = F_2 \cdot \cos \left(\operatorname{tg}^{-1} \cdot \left(\frac{l_{b_2} \cdot \cos(\alpha)}{y - l_{b_2} \cdot \sin(\alpha)} \right) \right) \cdot l_{b_2} \cdot \cos(\alpha) \quad (9.3)$$

$$\tau_{\alpha=90^\circ \geq \alpha \geq 0^\circ} = F_2 \cdot \cos \left(\operatorname{tg}^{-1} \cdot \left(\frac{l_{b_2} \cdot \cos(\alpha)}{y - l_{b_2} \cdot \sin(\alpha)} \right) \right) \cdot l_{b_2} \cdot \cos(\alpha) \quad (9.4)$$

- $\tau_{\alpha=0^\circ-90^\circ}$ Parell quan l'angle de barra α equival a un valor compres o igual a 0° i -90° (N·mm).
- $\tau_{\alpha=90^\circ \geq \alpha \geq 0^\circ}$ Parell quan l'angle de barra α equival a un valor compres o igual a 0° i 90° (N·mm).
- F_2 Força tensora del cable de transmissió de la molla (N).
 - F_{2x} Component horitzontal de la força F_2 (N)
 - F_{2y} Component vertical de la força F_2 (N)
- l_{b_2} Longitud de la barra de compensació b_2 , del punt de fulcre al punt d'aplicació de la força (mm).
- y Longitud del catet contigu del triangle entre l_{b_2} i l'angle de la força.
 - Equivalent a 552,85mm quan $l_{a \min}$.
 - Equivalent a 552,85mm+272mm quan $l_{a \max}$.

8.2.2. Efecte del pes propi dels conjunts en el parell d'assistència.

El pes total del conjunt z equival a 982,31g equivalent a 9,63N. El conjunt b té un pes de 352,74g equivalent a 3,46N, aquest es troba ubicat a 142mm des del punt de fulcre en la seva extensió màxima. Les meses dels components creant un moment d'assistència de 1108N.

$$\tau_{B \text{afegit}} = (m_{cz} \cdot l_{b_2 \max} - m_{bz} \cdot l_{cdg b}) \cdot g \quad (9.5)$$

$$\tau_{B \text{afegit}} = (0,982 \cdot 116 - 0,352 \cdot 142) \cdot 9,81m/s^2$$

$$\tau_{B \text{ afegit}} = 1108N \cdot mm$$

Els pesos del model afegeixen un parell de compensació equivalent a $1108N \cdot mm$. Resultant el parell màxim del model S/L 17626,4 en i el model L/XL en $34144,8N \cdot mm$.

- $\tau_{B \text{ afegit}}$ Parell afegit per les masses dels conjunts ($N \cdot mm$).
- m_{cz} Massa del conjunt z (kg).
- m_{bz} Massa del conjunt b (kg).
- g Acceleració de la gravetat (m/s^2)

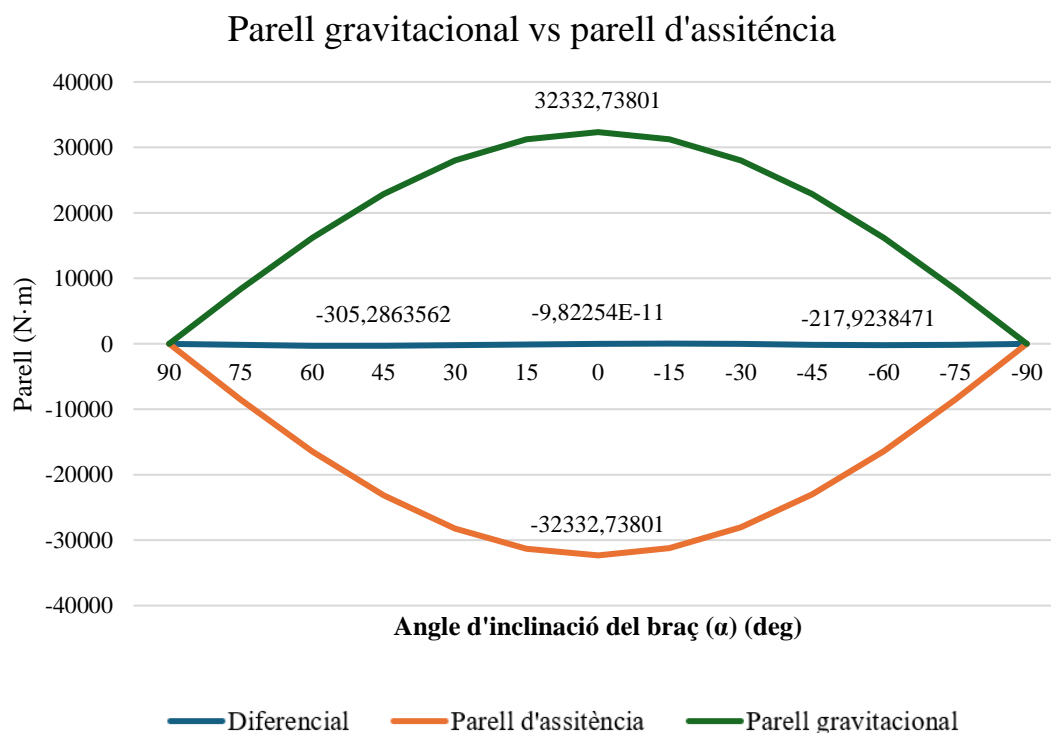
8.2.3. Discussió sobre el comportament del parell d'assistència.

En el model S/M s'observa una desviació de $29,12N \approx 2,97kg$, valor fàcilment compensable mitjançant els equips elàstics de l'arnés de subjecció. En el model L/XL la força en x equival a $58,24N \approx 5,9kg$, aquesta força derivada pot arribar a crear lleugeres molèsties en l'usuari.

L'error de compensació gravitacional, observat en la Fig. 8.3, adopta un valor màxim entre els 45° i 60° accedents, amb valor de $305N \cdot m$, suposant un error $\approx 0,943\%$.

Fig. 8.2

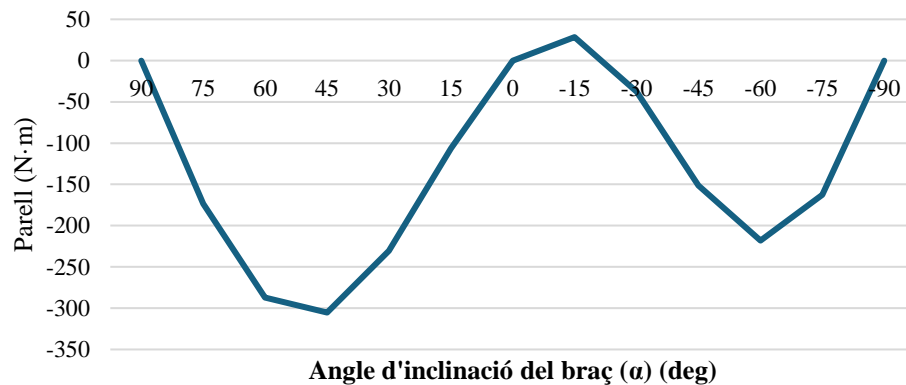
Parell gravitacional vs parell d'assistència



Nota: Comparativa del parell d'assistència del EXOumerus amb el parell de Parell gravitacional de l'usuari amb una força gravitacional amb valor de 181,6N aplicat a una distància de 178mm.

Fig. 8.3

Valor de l'error màxim en la transmissió del parell.



Nota: Gràfica del diferencial entre el parell d'assistència de l'EXOumerus i el gravitacional. En l'eix y es troba el Parell en N·mm i en l'eix x els graus de posició del braç. Font:[Elaboració pròpia]

8.3. Moviments permesos pel model EXOumerus.

Per a l'avaluació dels moviments permesos, s'ha utilitzat un model antropomètric d'ús lliure realitzat per l'usuari Barkfin [55]. Els plànols antropomètrics del model es poden consultar en la documentació -Plànols: Document 2-

El model seleccionat, malgrat compartir els valors antropomètrics als utilitzats en la documentació, presenta certes limitacions de moviment. Aquest no permet els 3 moviments escapulars i no permet la flexió de caràcter radial de la columna vertebral, només permet la flexió lumbar angular.

No obstant les limitacions observades, es considera un model correcte per a l'anàlisi de moviments que permet el mecanisme EXOumerus. Es realitzaran aproximacions i teorització de posició sobre els moviments escapulars.

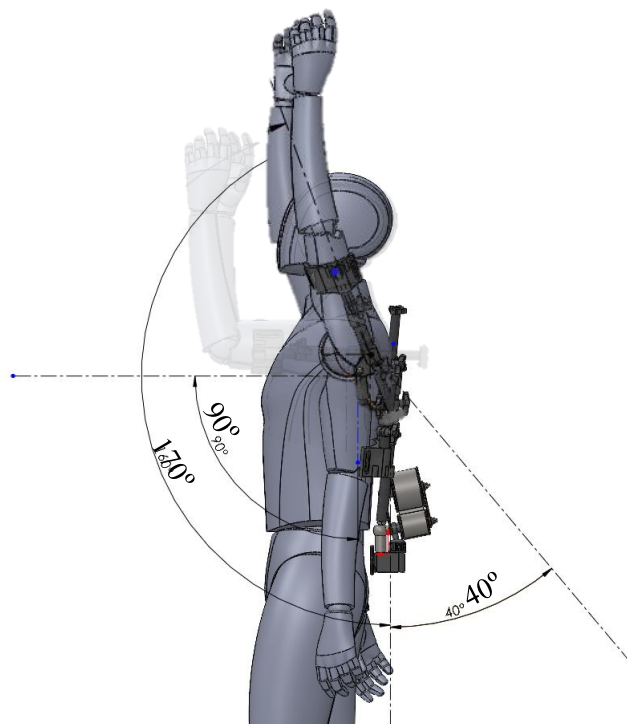
El rang permès observat durant la flexió i extensió del braç es troba en la Fig. 8.4 presenta col·lisions entre el conjunt b i a implicant l'extensió completa del braç. El rang permès pel

model ve limitat a un valor de 170° - 0° . Tanmateix, durant l'abducció i adducció horitzontal es presenta la limitació d'un rang de 160° - $3,4^{\circ}$ degut a col·lisions entre el conjunt b , en específic la barra b_2 amb l'esquena de l'usuari (Fig. 8.6).

Per altra banda, no existeixen col·lisions o limitacions de moviment durant l'abducció i adducció vertical, així com la rotació interna i externa mostrades en la Fig. 8.6 i Fig. 8.7 respectivament.

Fig. 8.4

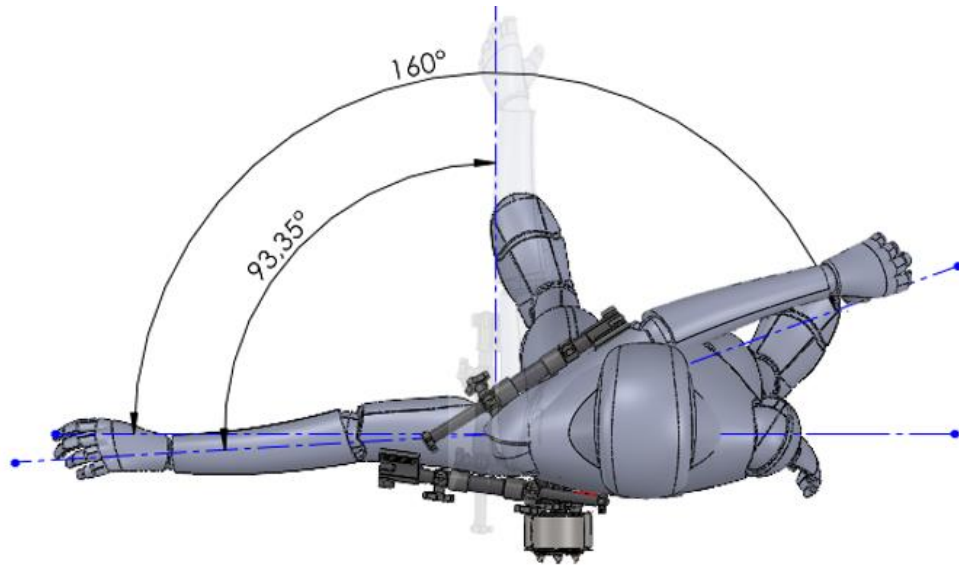
Flexió i extensió de l'espatlla d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOumerus.



Nota: Rang de moviment permès amb el model EXOumerus durant la flexió i extensió de l'espatlla. Font:[Elaboració pròpia]

Fig. 8.5

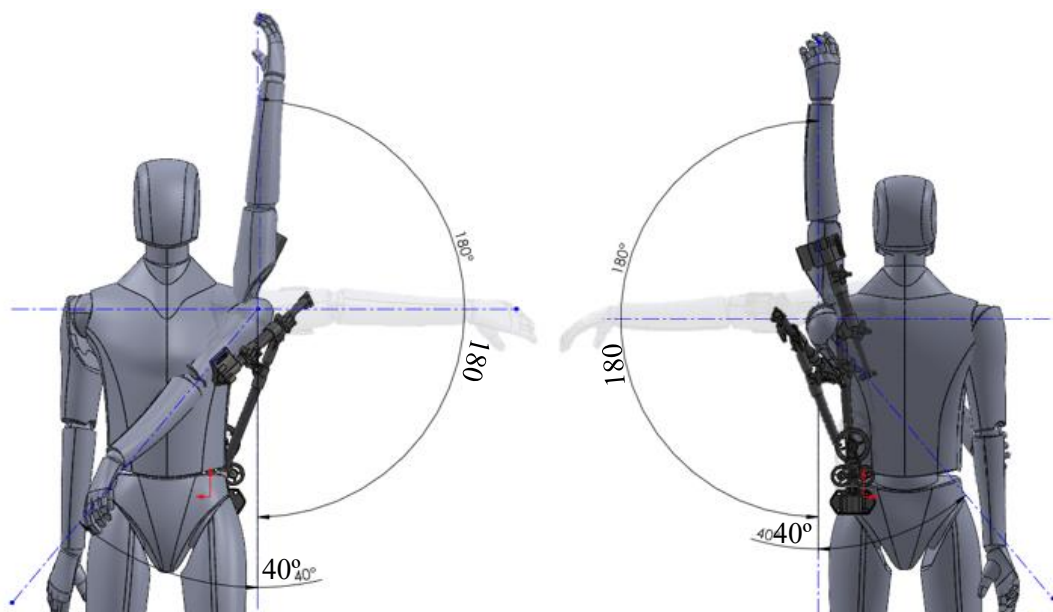
Abducció i adducció horitzontal de l'espatlla d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOumerus.



Nota: Rang de moviment permès amb el model EXOumerus durant l'abducció i adducció horitzontal de l'espatlla. Font:[Elaboració pròpia]

Fig. 8.6

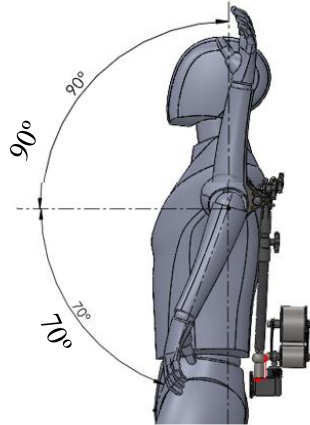
Adducció i abducció vertical de l'espatlla d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOumerus



Nota: Vista frontal i lateral del Rang de moviment permès amb el model EXOumerus durant la flexió i extensió de l'espatlla. Font:[Elaboració pròpia]

Fig. 8.7

Rotació interna i externa de l'espatlla d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOmerus

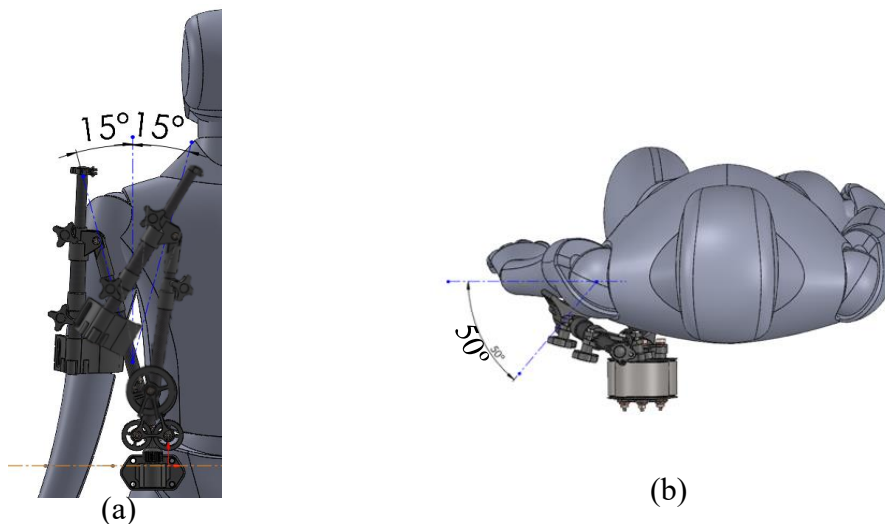


Nota: Rang de moviment permès amb el model EXOmerus durant Rotació interna i externa de l'espatlla. Font:[Elaboració pròpia]

El model no permet cap mena d'elevació o depressió escapular un cop tots els mecanismes telescòpics es troben bloquejats. L'estructura dissenyada no permet la translació vertical degut a la restricció dels graus de llibertat, aquest grau impediria la compensació de forces gravitacionals del model. En el cas de la protracció, retracció i rotació es terroritza en base a les simulacions aproximades dels desplaçaments que es permeten els moviments esmentats.

Fig. 8.8:

Protracció, retracció i rotació escapular d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOmerus.

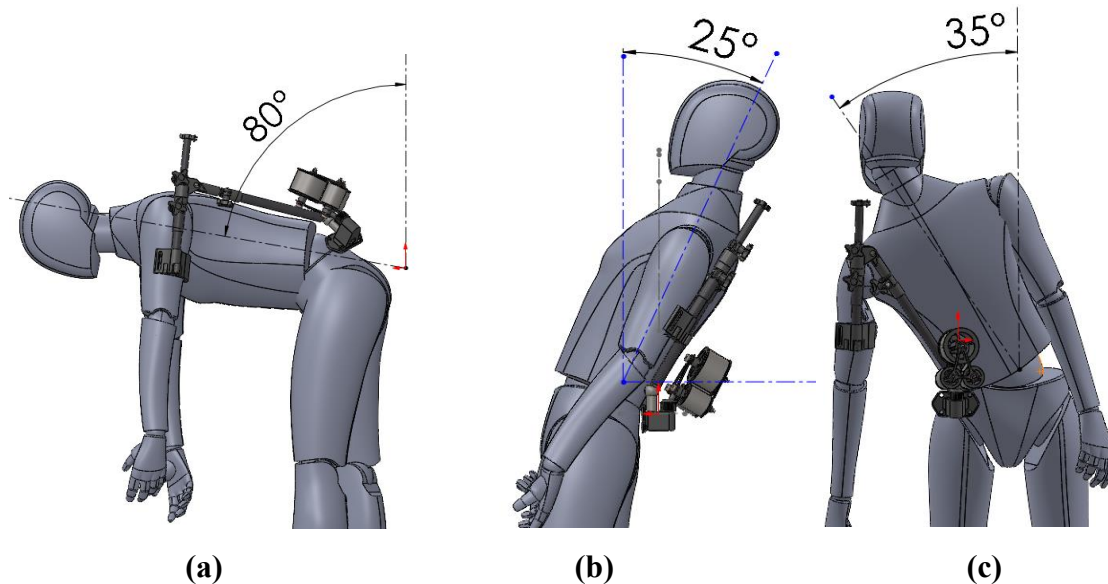


Nota: (a) Rang de moviment permès amb el model EXOumerus durant protracció i retracció de l'espatlla. (b) Rang de moviment permès amb el model EXOumerus durant rotació interna i externa de l'espatlla. Font:[Elaboració pròpia]

En les simulacions posicionals del model durant les diferents flexions i rotacions de l'esquena, s'observa com el dispositiu EXOumerus, s'adapta correctament a les diferents situacions. No obstant això, no es pot garantir la comoditat de l'usuari ni el funcionament correcte del parell en les variacions proposades. És possible que es produeixin forces de reacció que provoquin el lliscament del braçalet del braç.

Fig. 8.9

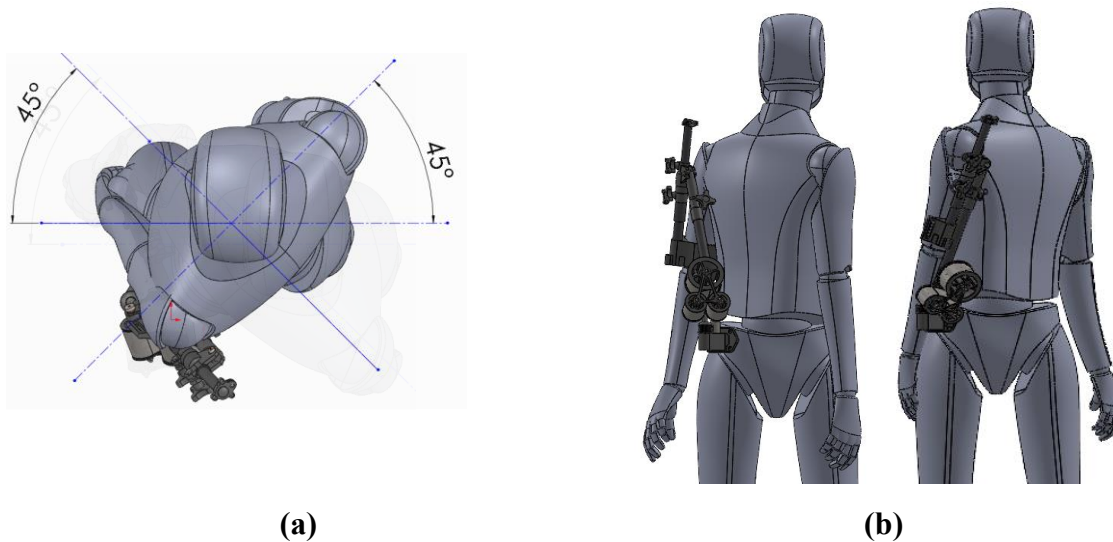
Flexió frontal i posterior de la columna d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOumerus.



Nota: Rang de moviment permès amb el model EXOumerus durant la (a) flexió frontal, (b) flexió posterior i (c) flexió lateral de l'esquena. Font:[Elaboració pròpia]

Fig. 8.10

Rotació de la columna d'un model antropomètric amb el dispositiu EXOmerus.



Nota: Rang de moviment permès amb el model EXOmerus durant la rotació de la columna vertebral (a) Vista superior. (b) Vista posterior. Font:[Elaboració pròpia]

9. Planificació.

La planificació i execució del present projecte s'ha confeccionat seguint la programació i metodologia proposada per Ángel Díaz al llibre “El arte de dirigir proyectos” [50], llibre enfocat a la direcció i gestió de projectes. Aquesta metodologia emprà l'ús d'eines com: diagrama de PERT, taules de prelacions i durades i diagrama de GRANT.

Adicionalment, s'utilitza la categorització de nivells EDT (WBS). A continuació es mostra la categorització de tasques en el següent llistat, on es mostren les dependències de nivell 1 com: Inici i definició, planificació, excussió, anàlisi de viabilitat, control i tancament; conjuntament amb les subdependències de nivell 2 i subdependències de nivell 3.

Estructura de desagregació.

1. Inici i definició.
 - 1.1. Identificació de les necessitat del sector d'estudi
 - 1.2. Definició i documentat de l'abast i objectius.
 - 1.3. Identificació de stakeholders i requisits.
 - 1.4. Investigació d'antecedents i marc teòric.
 - 1.4.1. Estudi de mercat i tecnologies existents.
 - 1.4.2. Estudi en profunditat de la relació ergonòmica entre exoesquelet i usuari.
 - 1.4.3. Anàlisi de requisits legals i de seguretat.
2. Planificació.
 - 2.1. Definició de les tasques necessàries per l'assoliment dels objectius.
 - 2.1.1. Creació d'una estructura de desglossament de treball (EDT).
 - 2.1.2. Establiment dels cronogrames de les dates de finalització esperades i les prelacions entre tasques.
 - 2.1.3. Assignació del recursos humans, tècnics i materials a les tasques pertinents.
 - 2.2. Desenvolupament del pressupost dels costos associats al projecte.
 - 2.3. Identificació dels possibles riscos i elaboració de plans de contingència.
3. Execució.
 - 3.1. Generació de les alternatives.
 - 3.1.1. Selecció de materials.

- 3.1.2. Disseny conceptual.
- 3.1.3. Definició de les dimensions.
- 3.2. Càlcul del valor i comportament del parell òptim.
- 3.3. Disseny a nivell del sistema.
- 3.4. Modelat 3D dels components individuals
- 3.5. Anàlisi d'esforços i punts de falles potencials.
- 3.6. Iteracions del disseny basat en els resultats obtinguts.
- 3.7. Modelat 3D de l'assemblatge.
- 3.8. Anàlisi de llibertat de moviment i possibles falles de col·lisió.
- 3.9. Simulació del funcionament en condicions de treball en altura.
- 3.10. Optimització del disseny per a millorar la seguretat.
- 3.11. Revisió crítica del disseny.
- 3.12. Anàlisi topològic del marc de suport.
- 3.13. Confecció dels plànols seguint normativa ISO 128.
- 4. Anàlisi de viabilitat.
 - 4.1. Anàlisi de viabilitat tècnica
 - 4.2. Anàlisi mediambiental.
 - 4.3. Anàlisi de viabilitat econòmica.
- 5. Control
 - 5.1. Seguiment del progrés i ajustos de desviació.
 - 5.2. Gestió de canvis i correcció.
- 6. Tancament.
 - 6.1. Revisió dels resultats del projecte.
 - 6.2. Revisió de la documentació.
 - 6.3. Entrega de la documentació.
 - 6.4. Preparació de la presentació.

Taula 9.1:*Taula de recursos de les dependències nivell 1*

Codi	Tasca	Recursos tècnics	Recursos materials	Durada (h)
1	Inici i definició	Microsoft Excel i Microsoft Word	Ordinador amb accés a internet	41
2	Planificació	Microsoft Project, Microsoft Excel i Microsoft Word	Ordinador	14
3	Execució	Solid Works, Solid Works Visualize i MatLab	Ordinador	328
4	Anàlisi de viabilitat	Microsoft Excel	Ordinador	19
5	Control	Microsoft Project	Ordinador	42
6	Tancament	Microsoft Word i Power Point	Ordinador amb accés a internet	41
Total d'hores				485

Nota: Durades i assignació de recursos de les dependències de nivell 1. Font: [Elaboració pròpia]

La planificació d'aquest projecte s'ha dividit en tres fases amb l'objectiu de complir amb les tres dates d'entregues estipulades. Les fases i el seu temps d'execució són les següents:

- Fase 1: Associada a la realització de l'Avantprojecte. Inicia el 24 d'octubre de l'any 2023 i finalitza el 12 de gener del 2024.
- Fase 2: Associada a la Memòria intermèdia. Inicia el 18 de gener i finalitza el 2 d'abril de 2024.
- Fase 3: Associada a la Memòria final del projecte i la preparació de la defensa. Inicia el 3 d'abril i finalitza el 25 de juny del 2024.

9.1. Fase 1: Avantprojecte.

La planificació ha sigut dissenyada amb una idealització aproximada d'una dedicació de 3 hores diàries de dilluns a dimecres i 5 hores diàries dissabte, observat a la Taula 9.2 . No obstant, dijous i divendres no es té previst la dedicació a l'elaboració del projecte o una dedicació inferior a 1h. És per aquest motiu que s'ha decidit no tenir-los en compte.

Taula 9.2

Programació setmanal de les hores dedicades en la fase 1.

	Dilluns	Dimarts	Dimecres	Dijous	Divendres	Dissabte	Diumenge
9:00 – 11:00							
17:00 - 20:00							

Nota: Calendari setmanal de dilluns a diumenge on s'indiquen de color verd les franges horàries on es té previst la realització del projecte en la fase 1.

Font: *[Elaboració pròpia]*

Es considera l'inici de l'avantprojecte la reunió de llançament que va tenir lloc el 24 d'Octubre. El seu final es considera el dia 12 de gener, dia programat per a l'entrega de la documentació. Es mostren les tasques de subdependències del nivell 2 realitzades durant la fase 1 a la Taula 9.3.

Taula 9.3

Tasques fase 1, les seves durades i prelacions

Codi	Tasca	Descripció	Durada (h)	Prelacions
1.1	A	Identificació de les necessitat del sector d'estudi	3	-
1.2	B	Definició i documentat de l'abast i objectius.	5	A
1.3	C	Identificació de stakeholders i requisits.	4	B

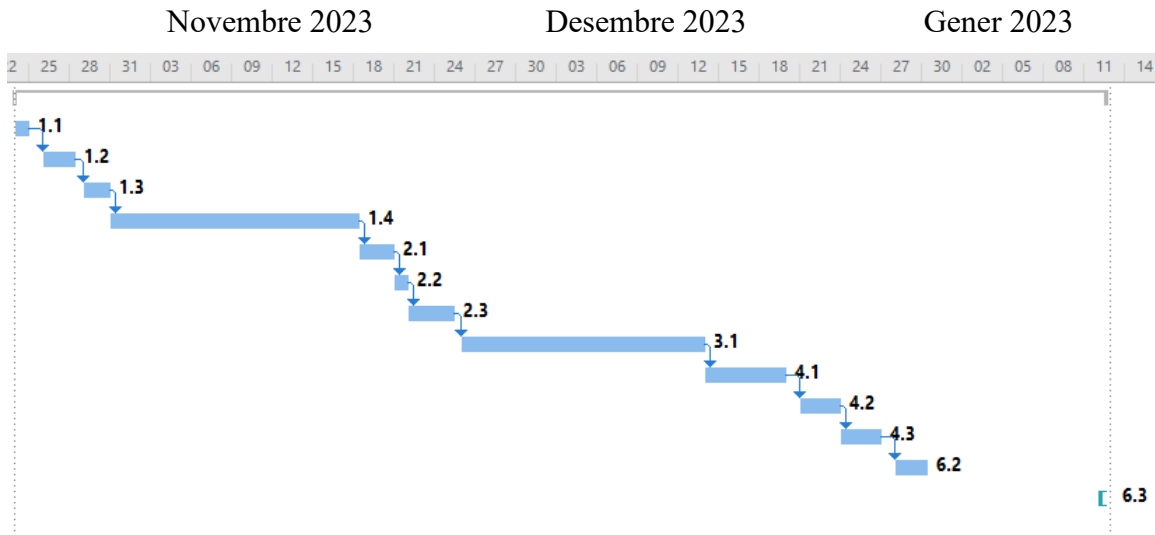
1.4	D	Investigació d'antecedents i marc teòric.	37	B
2.1	E	Definició de les tasques necessàries per a l'assoliment dels objectius	6	D
2.2	F	Desenvolupament del pressupost dels costos associats al projecte.	2	E
2.3	G	Identificació dels possibles riscos i elaboració de plans de contingència.	7	E
3.1	H	Generació de les alternatives.	38	D
4.1	I	Anàlisi de viabilitat tècnica	13	H
4.2	J	Anàlisi mediambiental.	6	H
4.3	K	Anàlisi de viabilitat econòmica.	8	H
6.2	L	Revisió de la documentació	5	K
6.3	M	Entrega de la documentació	0	L
Total d'hores			134	

Nota: Planificació de les tasques i activitats de la fase 1: Avantprojecte. Relacions de prelacions entre tasques i la seva duració mínima pronosticada. Font: [Elaboració pròpia]

Segons la planificació inicial, es calcula una folgança total de l'avantprojecte de 26 hores de treball disponibles abans de la seva entrega. La finalització mínima de l'avantprojecte es pronostica el dia 30 de Desembre.

Fig. 9.1

Diagrama de GANT de la fase 1 del projecte.



Font: [Elaboració pròpia]

9.2. Fase 2: Memòria intermèdia.

En aquesta fase, a diferència de la fase 1, es preveu una variació de l'horari. Es calcula una dedicació mitjana de 4 hores diàries. S'exceptua dilluns, dimarts i diumenges on no es preveu la inversió de temps en aquest projecte.

Taula 9.4

Programació setmanal de les hores dedicades en la fase 2.

	Dilluns	Dimarts	Dimecres	Dijous	Divendres	Dissabte	Diumenge
9:00 – 13:30							
16:00 - 21:00							

Nota: Calendari setmanal de dilluns a diumenge on s'indiquen de color verd les franges horàries on es té previst la realització del projecte en la fase 2. Font: [Elaboració pròpia]

Taula 9.5

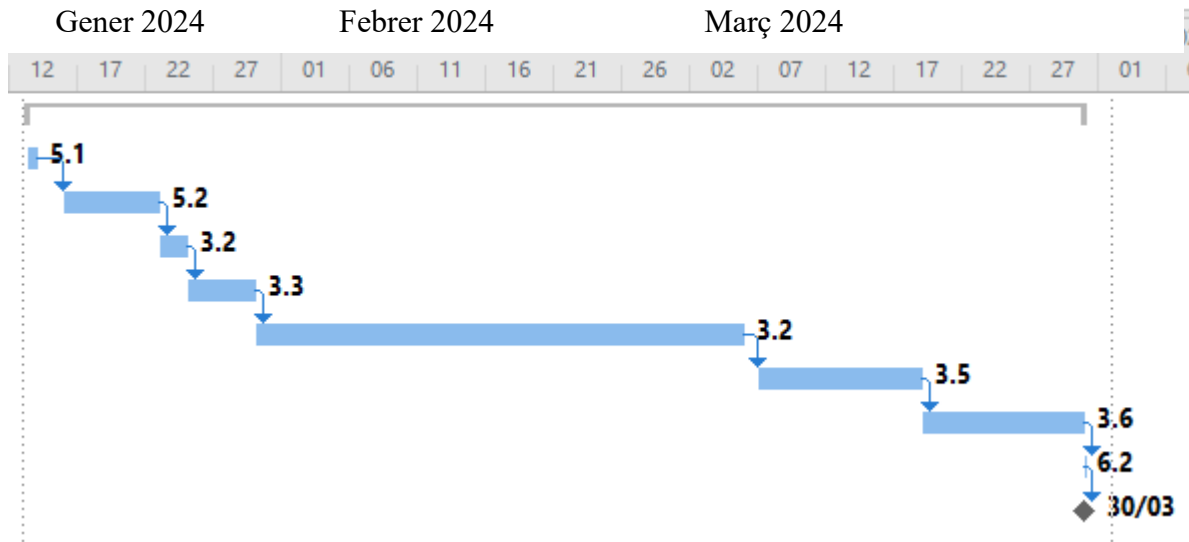
Tasques fase 2, les seves durades i prelacions.

Codi	Tasca	Descripció	Durada (h)	Prelacions
5.1	A	Seguiment del progrés i ajustos de desviació	5	Fase 1
5.2	B	Revisió de les correccions de la fase 1	16	Fase 1
3.2	C	Càlcul del valor i comportament del parell òptim.	6	-
3.3.	D	Disseny a niell del sistema	8	Fase 1
3.4	E	Modelat 3D dels components individuals.	74	D
3.5	F	Anàlisi d'esforços i punts de falles potencials.	24	E
3.6	G	Iteracions del disseny basat en els resultats obtinguts.	24	F
6.2	I	Revisió de la documentació	2	G
6.3	I	Entrega de la documentació	0	H
Total d'hores			159	

Nota: Planificació de les tasques i activitats de la fase 2: Memòria intermèdia. Relacions de prelacions entre tasques i la seva duració. Font: [Elaboració pròpia]

Fig. 9.2

Diagrama de GANT de la fase 2 del projecte.



Font: [Elaboració pròpia]

9.3. Fase 3: Memòria final i defensa del projecte.

En aquesta última fase es preveu una bona disponibilitat per a realització del projecte, on es destinen 5 hores diàries per a la realització del projecte, exceptuant dilluns i diumenges.

Taula 9.6

Calendari il·lustratiu de les hores de treball en la fase 3.

	Dilluns	Dimarts	Dimecres	Dijous	Divendres	Dissabte	Diumenge
9:00 – 13:30							
16:00 - 21:00							

Nota: Programació setmanal aproximada de les hores dedicades en la fase 3. Font: [Elaboració pròpia]

Taula 9.7*Tasques fase 3, les seves durades i prelacions*

Codi	Tasca	Descripció	Durada (h)	Prelacions
5.1	A	Seguiment del progrés i ajustos de desviació	5	Fase 2
5.2	B	Revisió de les correccions de la fase 2	16	Fase 2
3.7	H	Modelat 3D de l'assemblatge.	6	H
3.8	C	Anàlisi de llibertat de moviment i possibles falles de col·lisió.	36	Fase 2
3.9	D	Simulació del funcionament en condicions de treball en altura.	24	C
3.10	E	Optimització del disseny per a millorar la seguretat	12	D
3.11	F	Revisió crítica del disseny	6	E
3.12	G	Anàlisi topològica del marc de suport	35	F
3.13	H	Confecció dels plànols seguint normativa ISO 128	30	G
6.1	I	Revisió dels resultats del projecte.	17	H
6.2	J	Revisió de la documentació.	5	I
6.3	K	Entrega de la documentació	0	J
6.4	L	Preparació de la presentació	15	K
6.5	M	Tancament formal del projecte.	0	L
Total d'hores			207	

Nota: Planificació de les tasques i activitats de la fase 3: Memòria final. Relacions de prelacions entre tasques i la seva duració. Font: [Elaboració pròpia]

9.4. Seguiment del progrés i desviacions.

S'han observat diferents desviacions respecte a la planificació de la duració estimada inicial. Mitjançant el seguiment programat, s'han pogut dur a terme les accions de control programades en la planificació.

En el control realitzat el 12 de gener es va presentar un assoliment del $\approx 70\%$ de l'anàlisi econòmica. Per evitar el rataràs de la planificació es va optar per mitigar el problema mitjançant la dedicació progressiva d'hores al llarg de la Fase 2.

En el control realitzat el 2 d'abril no es van presentar endarreriments referent s la planificació del projecte.

El 25 de juny es va presentar un endarreriment del 60% del projecte. Durant les taques de simulació d'elements finits es van observar clares limitacions computacionals determinants per a la velocitat i capacitat de simulació dels models. El pla d'acció elaborat ha consistit en la realització d'una anàlisi de prioritat dels models crítics que afecten la funcionalitat del model i a les sol·licitacions més desfavorables. Addicionalment, es va realitzar una simplificació estructural per facilitar la capacitat de la central de processament.

9.5. Gestió de riscos i pla de contingència.

S'ha implementat el següent pla de contingència amb l'objectiu de minimitzar els riscos i assegurar que el projecte es completi dins del termini establert. S'ha seguit la metodologia proposada per A.Díaz [56]:

1. Identificació de riscos potencials.
2. Avaluació dels riscos segons la seva gravetat i probabilitat d'ocurrència,
3. Proposta d'un pla de contingència.
4. Monitoratge, seguiment i control.

9.5.1. Identificació de riscos potencials.

S'han identificat diversos riscos que es consideren de possible ocurrència i amb un impacte en el desenvolupament del projecte. Aquests s'han classificat en la Taula 9.8 en: riscos de

retràs de cronograma, canvis en el projecte, riscos tècnics, limitació de recursos i riscos de legislació.

Taula 9.8

Riscos potencials identificats

Identificació	Riscos	Descripció
Grup 1		
Riscos de retard de cronograma		
Risc 1.1.	Planificació inadequada	Falta d'una planificació detallada o la subestimació d'hores assignades a les taques
Risc 1.2	Falta d'experiència i coneixement	Risc per a una estimació inadequada de la complexitat de la feina en relació amb el coneixement i experiència del personal encarregat.
Risc 1.3	Esdeveniments extraordinaris	Els esdeveniments com festivitats, vacances o compromisos personals no planificats afecten al seguiment de la planificació inicial.
Grup 2		
Canvis en els requisits del projecte		
Risc 2.1	Modificació de l'abast del projecte.	Canvis en l'abast degut a necessitats no anticipades o impossibilitat tècnica.
Risc 2.2	Variacions en el disseny.	Variacions en el disseny a causa d'errors o canvis de requisits.
Risc 2.3	Desviacions en el pressupost.	Risc de probabilitat que el cost final del projecte excedeixi les estimacions inicials.
Grup 3		
Riscos tècnic		
Risc 3.1	Imprevistos i errors en el modelatge 3D	Risc d'aparició de problemes associats amb errors de software o de disseny.

Grup 4		Limitació de recursos
Risc 4.1	Dificultats en l'accés d'informació existent	Poden existir problemes a l'hora de l'accés d'informació o dades d'accés restringit o no gratuïtes.
Grup 5		Riscos de legislació
Risc 5.1	Identificació tarida de requisits legals	Al no comptar amb assessoria legal existeix el risc d'una incorrecta o insuficient cerca de normatives i directives.
Risc 5.2	Canvis en la legislació	Possibilitat de canvi de legislació durant la realització del projecte.

Nota: Grups de riscos potencials, el seu desglossament i les seves respectives descripcions i identificacions. Font: [Elaboració pròpia]

9.5.2. Anàlisi qualitatiu.

S'utilitza la següent matriu de probabilitat i impacte observada a la Taula 9.9 per a l'avaluació de la probabilitat d'ocurrència de cada risc així com el impacte que tinguin en el projecte.

Aquest anàlisi permet la priorització dels riscos a l'hora de l'assignació de recursos per a la seva mitigació.

Taula 9.9*Matriu de probabilitat i impacte*

		Impacte				
		Molt baixa 0,05	Baixa 0,10	Mitjana 0,20	Alta 0,40	Molt alta 0,80
Probabilitat	Molt alta 0,9	0,05	0,09	0,18	0,36	0,72
	Alta 0,7	0,04	0,07	0,14	0,28	0,56
	Mitjana 0,5	0,03	0,05	0,10	0,20	0,40
	Baixa 0,30	0,02	0,03	0,06	0,12	0,24
	Molt baixa 0,1	0,01	0,01	0,02	0,04	0,08

Nota: Matriu de probabilitat i impacte segons la seva quantificació: Molt alta, alta, mitjana, baixa i molt baixa. Font:[Elaboració pròpia]

Taula 9.10*Valoració dels riscos*

Identificació	Probabilitat	Impacte	Risc
Risc 1.1.	0,7	0,4	0,28
Risc 1.2	0,1	0,4	0,04
Risc 1.3	0,5	0,2	0,10
Risc 2.1	0,5	0,8	0,40
Risc 2.2	0,7	0,4	0,28
Risc 2.3	0,7	0,2	0,14
Risc 3.1	0,7	0,4	0,28
Risc 4.1	0,5	0,2	0,10
Risc 5.1	0,1	0,8	0,08
Risc 5.2	0,3	0,8	0,24

Nota: Risc quantitatiu de les tasques en referència a la probabilitat i la severitat de l'impacte. La columna de risc equival al valor de probabilitat per impacte. Font:[Elaboració pròpia]

9.5.3. Pla de contingència.

Taula 9.11

Pla de prevenció i contingència dels riscos

Pla de prevenció	Pla de contingència
Risc 1.1 Planificació inadequada	
Implementació d'accions de control i seguiment. Utilització d'eines de gestió de projectes com Microsoft Project per a una ràpida visualització i control dels estats de les tasques.	En cas de la detecció de desviacions significatives es planeja la realització d'hores extres d'emergència. Així com la prioritització de les tasques més rellevants.
Risc 1.2 Falta d'experiència i coneixement	
Recórrer a l'assistència externa i entrevista de professionals.	Modificació de l'abast del projecte a un adaptat als coneixements reals dels membres.
Risc 1.3 Malaltia o incapacitat del personal	
Planificació del cronograma del projecte tenint en compte les festivitats i vacances.	Inversió addicional del temps en els horaris de feina.
Risc 2.1: Modificació de l'abast del projecte	
Definició clara de l'abast des del començament. Valoració dels canvis implicats abans de la decisió de modificació.	Revisar i ajustar la planificació del projecte, en cas de ser necessari invertir més hores extres de treball.
Risc 2.2: Variacions en el disseny	
Realització de revisió del disseny freqüents amb aprovacions del ponent.	Adaptar el pressupost i modificació de la planificació d'acord amb la variació.

Risc 2.3: Desviacions del pressupost

Realització d'una anàlisi detallat del pressupost al inici del projecte. Inclusió d'un marge dedicat a imprevistos.	Identificar àrees on es pot reduir el cost o si és necessari buscar finançament addicional.
---	---

Risc 3.1: Imprevistos i errors en el modelatge 3D

Guardar còpies de seguretat al llarg de la realització i elaborar un disseny minuciós i amb cura.	En cas d'errors crítics en el modelat, revisar les versions anteriors correctes i determinar l'error.
---	---

Risc 4.1: Dificultat en l'accés d'informació existent

Consultar amb el ponent i el col·legi d'enginyers per accés a informació restringida.	Buscar fonts alternatives o reavaluar els requisits del projecte per adaptar-se a la informació disponible.
---	---

Risc 5.1: Identificació tardada de requisits legals

Access a normatives i assessorament des del col·legi d'enginyers.	Modificar les àrees del projecte per a complir les normatives vigents.
---	--

Risc 5.2: Canvis en la legislació

Mantenir-se actualitzat per la legislació vigent respecte a les àrees d'interès, informar-se amb anterioritat per actuar amb temps.	Adaptar el projecte a les noves legislacions de manera immediata.
---	---

Nota: Llistat de plans de prevenció per a la prevenció d'aparició dels riscos i plans de contingència en cas de ser inevitables. Font:[*Elaboració pròpia*]

10. Impacte mediambiental.

El projecte tracta del disseny d'un exoesquelet passiu enfocat al sector industrial europeu. Tot i no confeccionar-se el disseny en la realització del projecte, es plantegen els impactes durant l'adquisició, l'ús i final de la vida útil del model.

En aquest estudi d'Impacte mediambiental, es consideren diferents aspectes que tenen a veure amb factors ambientals impactants.

L'extens recull de taules es troba en l'apartat d'annexos del document com -Informe mediambiental: Llistes de control-.

Es recullen a continuació, en forma de taula, les principals accions i factors que s'hauran de prendre en consideració en l'estudi de detall.

10.1. Accions impactants.

Taula 10.1

Taula que recull les accions impactants del projecte

Fase	Accions Impactants	Observacions
Fase de Construcció o Execució	Consum de materials durant el prototipatge inicial	L'ús de materials reciclats pot reduir l'impacte mediambiental mitjançant el reutilitzat i estalvi energètic. Optimització de la logística per a minimitzar les emissions de CO2 durant el transport.
	Emissions derivades del transport de materials i components	
	Consum d'energia en el procés de fabricació.	
Fase de Funcionament o Explotació	No es troben accions impactants relacionades amb la fase d'explotació	
Fase d'Ús	Degradació del material i components al llarg del temps.	

	Generació de residus al final de la vida útil de l'exoesquelet.	
--	---	--

Nota: Accions impactant valorades des de la fabricació del model fins al final de la seva vida útil. *Font: [Elaboració pròpia]*

10.2. Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS).

Les ODS són els 17 objectius de desenvolupament sostenible establerts per les Nacions Unides l'any 2015 [51]. Aquests objectius aborden les problemàtiques globals més urgents. A raó d'això, per a la realització d'aquest projecte s'han tingut en compte els següents objectius:

- **Indústria, innovació i infraestructura– ODS 9:** A través de la innovació de les tecnologies d'assistència.
- **Salut i benestar – ODS 3:** El propòsit del disseny és la reducció de TME i fatiga en el món laboral.
- **Producció i consum responsable - ODS 12:** Es tenen en compte el cicle de vida complet dels materials utilitzats.
- **Acció climàtica – ODS 13:** Proporcionant solucions alternatives a l'ús de les bateries.

11. Perspectiva de gènere.

El disseny del EXOumerus ha estat dissenyat per adaptar-se a les variacions corporals que poden existir entre homes i dones. Les diferències de força, pes i estatura general es consideren factors que influeixen significativament en la interacció de l'usuari amb el dispositiu. Per aquest motiu, s'han desenvolupat dos models de diferent tallatge per garantir l'adaptabilitat a una ampla demografia, sense distinció de gènere.

El model S/M orientats a pesos inferiors i el model L/XL orientat a usuaris amb pesos superiors. Aquesta segmentació permet la inclusió d'amplis rangs d'alçada i pesos abastant així les distribucions estadístiques típiques de la població, tal com es mostra a la Fig 2.15 incloses mides que es devien dels valors estàndards, tant inferiors com superiors.

El disseny de l'arnès ha sigut concebut per permetre a l'adaptabilitat òptima a tots dos gèneres. Durant el seu desenvolupament, s'han tingut en compte múltiples factors antropomètriques per evitar qualsevol molèstia o inadequació que pogués emergir en algun dels gèneres. Aquest enfocament holístic garanteix que la confortabilitat i ajustatge de l'arnès a les diferències individuals en mida i forma del cos.

El model final del EXOumerus permet una personalització extensa, inclosos ajustatges en:

- Tots els conjunts de barres estructurals, permetent modificacions en la configuració per adaptar-se a la morfologia individual.
- La posició dels elements d'interfície. Tot i proporcionar recomanacions de posició segons el pes i l'altura, es permet la personalització lliure de la posició i ajustatge al braç.
- Les longituds dels components tèxtils de l'arnès permeten assegurar un bon ajust i suport estructural.
- L'augment i disminució de la càrrega d'assistència facilita a l'usuari la graduació del parell segons les necessitats específiques de l'usuari.

12. Futures implementacions.

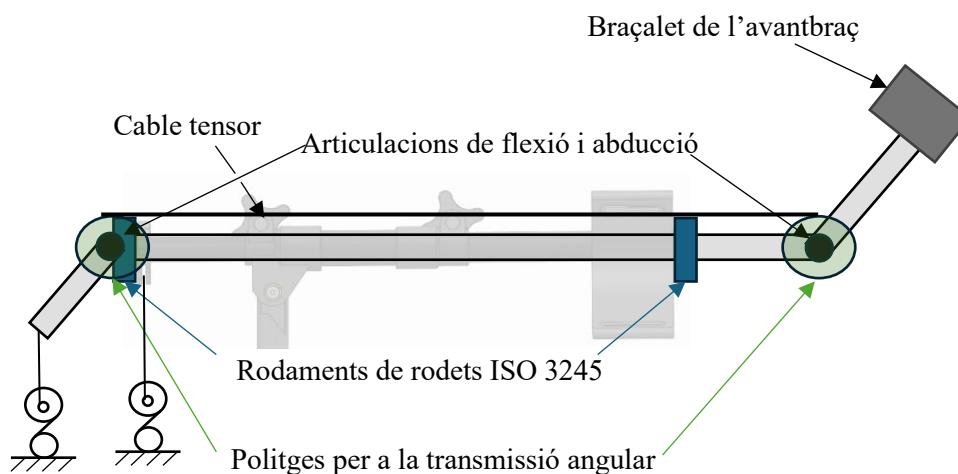
El present model, com bé s'ha validat, la capacita de compensació del perfil gravitacional del braç sempre que l'avantbraç es mantingui en angle constant respecte a l'horitzontal. Quan es produeix la variació angular de l'avantbraç de la situació 2.b a la situació 1, el parell d'assistència de l'exoesquelet es manté constant, en conseqüència es produirà una zona de sobre compensació, un punt d'equilibri i un punt de compensació insuficient. Aquest model és adient per posicions estàtiques.

La incorporació a futur valorada consisteix en un mecanisme modular centrat en la compensació gravitacional en el colze segons la posició de l'avantbraç. El mòdul presenta 2 graus de llibertat, flexió i extensió de l'avantbraç al voltant de l'eix ML i la rotació interna i externa al voltant de l'eix MP.

Aquest sistema de palanques de compensació consisteix en una rèplica posicional del braç a menor escala que permet la compensació del pes del braç i avantbraç en base a les posicions angulars del braç i avantbraç.

Fig. 12.1

Diagrama simplificat del mòdul de compensació de l'avantbraç.



Nota: Diagrama simplificat del mòdul de compensació gravitacional de l'avantbraç.

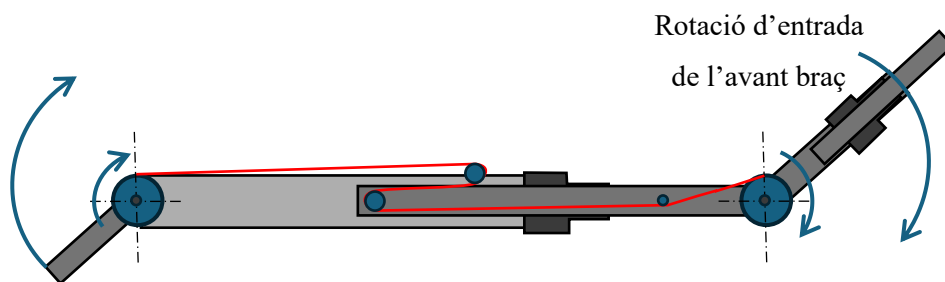
Font:[Elaboració pròpia]

Aquest mòdul permet la integració en el model base mitjançant en els punts de fixació adaptats en el mode en l'element 'Abraçadora d'interconnexió b i z' i el 'braçalet de subjecció', observats en la Fig. 7.2. En els punts de fixació s'incorporen dos rodaments de rodets ISO 3245 amb gàbia per permetre la rotació al voltant de MP evitant possibles friccions que la dificultin.

La transmissió angular del mòdul es produeix mitjançant un cable tensor fixat a dues políctges, una en cada articulació, transmeten la posició de l'avantbraç a través del model fins a la barra de compensació. Es busca la preservació de la longitud del cable durant la regulació de la longitud de les barres, es proposa el mecanisme observat a

Fig. 12.2

Diagrama del mecanisme telescòpic i la transmissió angular per cable tensor

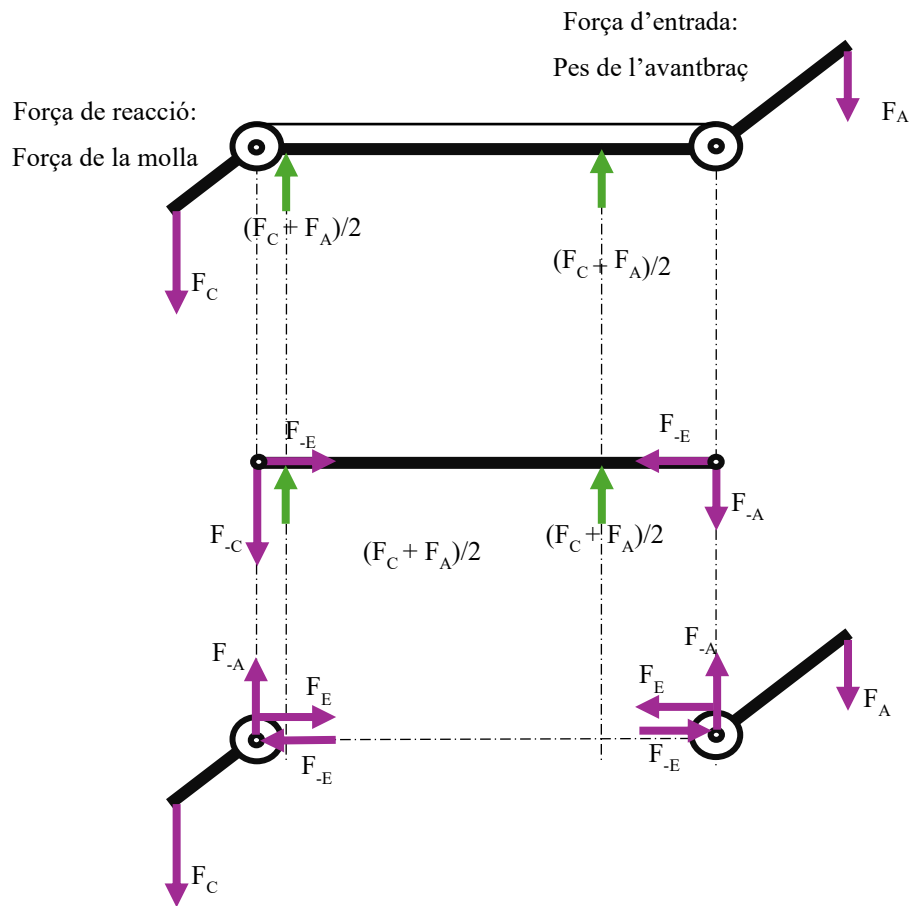


Nota: sistema de políctges intern per a mantenir la longitud del cable tensor durant la variació de longitud de barra. Font:[*Elaboració pròpia*]

El disseny proposat assisteix en la compensació gravitacional durant la flexió i extensió de l'avantbraç al voltant de l'eix ML i la rotació interna i externa al voltant de l'eix MP.

Fig. 12.3

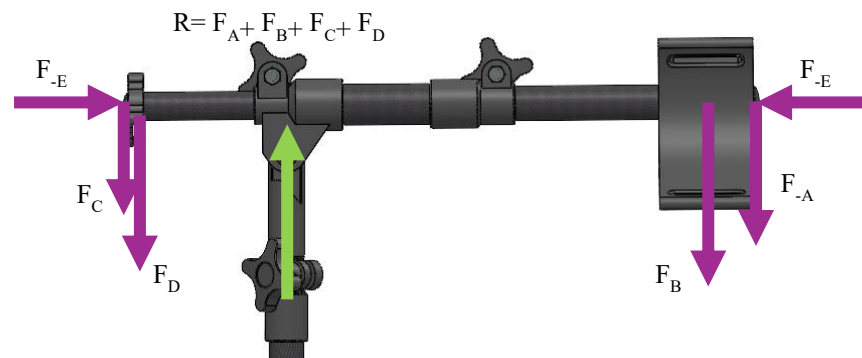
Diagrama de cos lliure dels elements del mòdul



Nota: Diagrames de cos lliure dels elements del mòdul. Font: [Elaboració pròpia]

Fig. 12.4

Diagrama de cos lliure del model base



Nota: Diagrama de cos lliure de les forces de reacció del model en el model base conjunt b.

Font:[Elaboració pròpia]

13. Conclusions.

Un cop realitzat l'estudi, anàlisi i simulació del model EXOumerus, es conclou que s'ha realitzat un estudi prou exhaustiu per a establir les bases del disseny, garantint el funcionament correcte i la resistència adequada per al seu ús. Mitjançant les simulacions CAD i els càlculs realitzats, s'ha demostrat que el model és capaç de compensar amb un error inferior al 0,94% d'error el parell gravitacional del braç. En conseqüència, es considera com un model d'assistència capaç de reduir significativament la càrrega sobre les articulacions i músculs implicats en l'elevació i sustentació del braç.

En la Taula 13.1 s'observa com s'han assolit els objectius i especificacions establerts per al projecte amb èxit. Cal destacar la significativa capacitat màxima que proporcionen els models de tallatge S/M i L/XL, en comparació amb els objectius i els models passius comercialitzats. Per una altra banda, en la Taula 13.2 s'observen diferents limitacions en els objectius de mobilitat. Degut al disseny del model es presenten col·lisions entre el model o amb l'usuari durant la moció d'extensió i adducció horitzontal del braç, així com l'elevació i depressió escapular. Aquestes limitacions són considerades clau per a futures iteracions de disseny.

Es considera, el model EXOumerus, com una solució amb potencial per al suport i la reducció de càrrega en els ambients laborals, contribuint a la reducció de TME. Mitjançant els estudis de viabilitat tècnica, econòmica i ambiental, s'han obtingut resultats prometedors de cara a la seva implementació futura en entorns industrial, suposant un baix cost d'elaboració i baix impacte mediambiental.

Taula 13.1

Valoració d'assoliment dels objectius i especificacions tècniques..

Descripció	Especificacions tècniques	Valors de l'EXOumerus	
		Model S/M	Model L/XL
Pes del conjunt sense l'arnès	<4kg	3,70kg	3,86kg
Capacitat de compensació màxima	>4kg	9,45kg	18,91kg
Regulació del model	>1kg	1,33kg - 9,45kg	2,66kg – 18,91kg
Adaptabilitat a braços de longitud(valor entre espatlla i colze)	>356mm i 391mm	260mm i 391mm	260mm i 391mm
Longitud de la esquena (valor entre maluc i espatlla)	>476mm i 714mm	476mm i 714mm	476mm i 714mm

Nota: La coloració verda en la columna “Moviments permesos per el EXOumerus” indica un compliment correcte dels objectius de mobilitat especificats. Font: [Elaboració pròpia]

Taula 13.2*Valoració d'assoliment dels objectius de rangs moviment.*

Moviments	Rang de moviment naturals	Moviments permesos per l'EXOumerus	
Moviment de l'espatlla			
Flexió i extensió	170° 40°	170°	0°
Abducció i adducció horitzontal	160° 50°	160°	3,33°
Abducció i adducció vertical	180° 40°	180°	40°
Rotació interna i externa	70° 60°	70°	60°
Moviment escapular			
Elevació	0° - 30°	0°	0°
Depressió	0° - 5°	0°	0°
Protracció	0° - 15°	0°	15°
Retracció	0° - 15°	0°	15°
Rotació	0° - 50° (antihorari)	0°	50°
Moviment de la columna			
Flexió frontal	0° - 80°	0°	80°
Flexió posterior	0° - 25°	0°	25°
Flexió lateral	0° - 35°	0°	35°
Rotació	0° - 45°	0°	45°

Nota: La coloració verda en la columna “Moviments permesos per l'EXOumerus” indica un compliment correcte dels objectius de mobilitat especificats, en contra posició, la coloració vermella marca la limitació de moviment i el no compliment amb els objectius establerts.

Font: [Elaboració pròpia]

15. Referències.

- [1] Ministeri de treball i economia social, «Exoesqueletos I: Definición y clasificación,» 2021.
- [2] J. A. de la Tejera, R. Bustamante Bello, R. A. Ramirez Mendoza y J. Izquiero Reyes, «Systematic Review of Exoskeletons towards a General,» Monterrey, 2020.
- [3] eksoBioncis, «What Are Human Robotic Exoskeletons Made Of?,» 14th April 2022. [En línia]. Available: <https://eksobionics.com/what-are-human-robotic-exoskeletons-made-of/>. [Último acceso: 24th November 2023].
- [4] cyberne, «1890 – ASSISTED-WALKING DEVICE – NICHOLAS YAGN (RUSSIAN),» 14 Octubre 2010. [En línia]. Available: <https://cyberneticzoo.com/walking-machines/1890-assisted-walking-device-nicholas-yagn-russian/>.
- [5] Cyberne, «1917 – “PEDOMOTOR” STEAM-POWERED RUNNING DEVICE – LESLIE C. KELLEY (AMERICAN),» 5 Setembre 2011. [En línia]. Available: <https://cyberneticzoo.com/man-amplifiers/1917-pedomotor-steam-powered-running-device-leslie-c-kelley-american/>.
- [6] J. A. Tejera, «Development and implementation of a categorization model for the exoskeletons based on their design characteristics and practical projects,» p. 131, 2020.
- [7] J.-L. R. L. H. a. R. S. H. Kazerooni, «On the Control of the,» *University of California*, p. 8, 2005.
- [8] Ministerio de ciencia, innovación y universidades, «Exoesqueleto Exo-H3,» 2020. [En línia]. Available: <https://www.technaid.com/es/productos/robotic-exoskeleton-exo-h3/>.

- [9] A. Sanchis, «Para qué (y cómo) se están usando los exoesqueletos en las fábricas españolas,» 2020.
- [10] roboticsbiz, «Active Vs. Passive Exoskeletons Explained,» 29 d'Octubre del 2021. [En línia]. Available: <https://roboticsbiz.com/active-vs-passive-exoskeletons-explained/>.
- [11] BlogSEAS, *Qué es y qué aplicaciones tiene un exoesqueleto*, 2021.
- [12] Directory of Exoskeleton Companies., «Updated Directory of Exoskeleton Companies and Industry Statistics,» 16 December 2021. [En línea]. Available: <https://exoskeletonreport.com/2021/12/updated-directory-of-exoskeleton-companies-and-industry-statistics/>. [Último acceso: 22th November 2023].
- [13] I. Halim, Z. Abdullah, P. A. Perumal, M. Zaimi, M. Nazrin Muhammad i S. Abdullah, «Critical Factors Influencing User Experience on Passive Exoskeleton Application: A Review,» *IJIE*, Malaysia, 2021.
- [14] S. Mänttari, A.-P. Rauttola, J. Halonen, J. Karkulehto, P. Säynäjäkangas y J. Oksa, «Effects of an exoskeleton on muscle activity in tasks requiring arm elevation: Part I - Experiments in a controlled laboratory setting,» National Library of Medicine, 2023.
- [15] Y.-K. Kong, J. Ho Him, H.-H. Shim, J.-W. Shim, S.-S. Park y K.-H. Choi, «Efficacy of passive upper-limb exoskeletons in reducing musculoskeletal oad associated with overhead tasks,» Elsevier, 2023.
- [16] B. Arnoux, A. Farr, V. Boccara y N. Vignais, «Evaluation of a Passive Upper Limb Exoskeleton in Healthcare Workers during a Surgical Instrument Cleaning Task,» National Library of Medicine, Orsay, 2023.
- [17] A. Brunner, R. van Sluijs, T. Luder, C. Camichel, M. Kos, D. Bee, V. Bartenbach y O. Lambercy, «Effect of passive shoulder exoskeleton support during working with arms over shoulder level,» Cambridge Univeristy Press, Zurich, 2023.

- [18] J. Theurel, K. Desbrosses, T. Roux y A. Savescu, «Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks,» Elsevier, 2018.
- [19] H.-M. Wang, D. K. Linh Le y W.-C. Lin, «Evaluation of a Passive Upper-Limb Exoskeleton Applied to Assist Farming Activities in Fruit Orchards,» Kaohsiung, Taiwan, 2021.
- [20] M. Paterna, S. Magnetti Gisolo, C. De Benedictis, G. Gerardo Muscolo y C. Ferraresi, «A passive upper-limb exoskeleton for industrial application based on pneumatic artificial muscles,» Verona, Italy, 2022.
- [21] S. De Bock, M. Rossini, D. Lefeber, C. Rodriguez Guerrero, J. Geeroms, R. Meeusen i K. De Pauw, «An Occupational Shoulder Exoskeleton Reduces Muscle Activity and Fatigue During Overhead Work,» 2022.
- [22] S. Ding, A. Reyes Francisco, T. Li y H. Yu, «A novel passive shoulder exoskeleton for assisting overhead work,» Cambridge univeristy press, Signapore, 2022.
- [23] F. Balsler, R. Desai, A. Ekizoglou i S. Bai, «A Novel Passive Shoulder Exoskeleton Designed With Variable Stiffness Mechanism,» IEEE, 2022.
- [24] Reddit, «Has anybody tried it yet?,» 10 de Maig del 2021. [En línia]. Available: <https://www.reddit.com/r/Tools/comments/17j33hk/comment/k6zh4bi/>.
- [25] Exhaus, *Exhaus exosquelettes*, Francia, 2013.
- [26] Subdirección General de Estadística y Análisis Sociolaboral, «Estadística de accidentes de trabajo,» 2022.
- [27] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), *Accidentes de trabajo por sobreesfuerzos*, Madrid, 2021.
- [28] ASTM, *F3474 – 20:Establishing Exoskeleton Functional Ergonomic Parameters and Test Metrics*, 2021.

- [29] D. A. Naumann, *Kinesiology of the Musculoskeletal System*, 3rd edition ed., Mosby, 2016.
- [30] S. Jones, «Unit 8 Anatomy - Glenohumeral joint articulations and movements/ Neurovasculars,» [En línea]. Available: <https://quizlet.com/445197028/unit-8-anatomy-glenohumeral-joint-articulations-and-movements-neurovasculars-flash-cards/>. [Último acceso: 23rd December 2023].
- [31] M. Schenkman y V. Rugo De Cartaya, «Kinesiology of the Shoulder Complex,» 2017.
- [32] Erson Religioso, «Q&A Time! Spinal Loading/Unloading vs Disc/Movement,» 20th March 2017. [En línea]. Available: <https://xtensal.com/>. [Último acceso: 23th December 2023].
- [33] D. J. Lura, «Modeling upper body kinematics while using a transradial prosthesis,» Florida, 2008.
- [34] WorldData, «Average height and weight by country,» January 2024. [En línea]. Available: <https://www.worlddata.info/average-bodyheight.php>. [Último acceso: 1st December 2023].
- [35] M. Roses, C. Roser y H. Ritchie, «Human Height,» *Our World Data*, 2024.
- [36] Universitat de Waterloo, *Biomechanica y control motor del movimiento humano*, Waterloo, Ontario: John Wiley & Sons, 1990.
- [37] C. Columbs, «Exploring Relationships in Body Dimensions,» RPubS, 2019.
- [38] OpenAI, «ChatGPT,» 2024. [En línea]. Available: <https://chat.openai.com>.
- [39] Rigid Lifelines, «Harness materials and degradation,» 31th May 2013. [En línea]. Available: HARNESS MATERIALS AND DEGRADATION. [Último acceso: 4th December 2024].

- [40] Osprey, 2024. [En línea]. Available: <https://osprey.mx/blogs/historias/materiales-de-una-mochila>. [Último acceso: 17 de Gener del 2024].
- [41] J. A. J. Díaz, «Polímers, creàmics i compostos,» Tecnocampus, Mataró, Barcelona, 2023.
- [42] Vulcan Spring, «Design Guide,» [En línea]. Available: https://www.vulcanspring.com/wp-content/uploads/2019/02/Vulcan_Spring_Design_Guide.pdf. [Último acceso: 29 de Febrer 2024].
- [43] A. E. Öçal, H. Lekesiz y S. Telli Çetin, «The Development of an Innovative Occupational Passive Upper Extremity Exoskeleton and an Investigation of Its Effects,» applied sciences, Bursa, 2023.
- [44] Exoskeleton Report, «EVO,» [En línea]. Available: <https://exoskeletonreport.com/product/evo/>. [Último acceso: 3th January 2024].
- [45] TROCELLEN, «Espumas industriales: ¿Cuáles son las características de la espuma de polietileno en comparación con la goma EVA?,» [En línea]. Available: <https://trocellen.com/es/espumas-industriales-cuales-son-las-caracteristicas-de-la-espuma-de-polietileno-en-comparacion-con-la-goma-eva/>.
- [46] Colchon expres, «Viscogel o viscoelástico. Elige tu colchón,» [En línea]. Available: <https://www.colchonexpres.com/blog/viscogel-o-viscoelastico>.
- [47] Carbon Fiber Tubes Ltd, «Standard Tubing,» [En línea]. Available: <https://www.carbonfibretubes.co.uk/standard-tubing/>. [Último acceso: 1 de Maig del 2024].
- [48] Toray, «T700S Standard modulus Carbon Fiber,» 17 de Gener del 2018. [En línia]. Available: <https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/T700S-Technical-Data-Sheet-1.pdf>. [Últim accés: 4 d' Abril del 2024].

- [49] H. Rahmani, S. Heydar Mahmoudi Najafi i A. Ashori, «Elastic Properties of Carbon Fibre-Reinforced Epoxy Composites,» Setembres de 2015. [En línia]. Available: https://www.researchgate.net/publication/281107506_Elastic_Properties_of_Carbon_Fibre-Reinforced_Epoxy_Composites#fullTextFileContent. [Últim accés: 3 d'Abril del 2024].
- [50] Jinjiuyi Carbon Fiber Team, «T700 Carbon Fiber Sheet,» [En línia]. Available: <https://matmatch.com/materials/jinj0002-t700-carbon-fiber-sheet> . [Último acceso: 4 d'Abril del 2024].
- [51] Mat Web, «Overview of materials,» [En línia]. Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=675b77f996b142f59e4cb60d69d64872&ckck=1>. [Últim accés: 28 de Març del 2024].
- [52] Hintek, «Arnés de manipulació,» Manutan, [En línia]. Available: <https://www.manutan.es/es/mas/arnes-de-manipulacion-hintek#productBeginIndex:0&orderBy:7&>. [Último acceso: 1st Jenuary 2024].
- [53] Mil-Tec, «Mochila Teesar de carga fontal de 100litros,» Recon Company, [En línia]. Available: <https://www.recon-company.com/es/teesar-rucksack-frontloader-100-liter/12697?number=403020.001>. [Último acceso: 1st Jenuary 2024].
- [54] Lobo tactical, «Mochiles tactiques.,» [En línia]. Available: <https://lobotactical.com/seccion/mochilas-y-bolsas/mochilas/>. [Último acceso: 1st Jenuary 2024].
- [55] Barkfin, «GrabCad,» 5 de Maig del 2022. [En línia]. Available: <https://grabcad.com/library/articulated-dummy-1>. [Último acceso: 6 de Maig del 2024].
- [56] Á. Díaz Martín, El arte de dirigir proyectos, 3ª Edició ed., Madrid: RA-MA, 2010.

- [57] Naciones Unidas, «Objetivos de desarrollo sostenible,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. [Último acceso: 10 January 2024].
- [58] «Instituto Nacional de Estadística,» 1999. [En línea]. Available: <https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t25/p442/histo/a1999/10/&file=02082.px#!tabs-tabla>. [Último acceso: 1 02 2024].
- [59] Talent, «Salario medio para Ingeniero Junior en España, 2024,» 2024. [En línea]. Available: <https://es.talent.com/salary?job=ingeniero+junior>.
- [60] weavertextile, «Uhmwpe Webbing & Rope,» [En línea]. Available: <https://www.weavertextile.com/uhmwpe-webbing/dyneema-webbing-strap.html>. [Último acceso: 9th January 2024].
- [61] Catorze, «Colchones De Goma Espuma,» [En línea]. Available: <https://catorze.es/colchones-de-goma-espuma/>. [Último acceso: 5th December 2024].
- [62] modulator, «Cintas de goma de elastómeros termoplásticos,» [En línea]. Available: <https://www.modulator.de/es/cintas-de-goma-de-elastomeros-termoplasticos-app-90-x-10-mm-pink-20-units.html>. [Último acceso: 5th December 2024].
- [63] Shantou Hongkui Weaving Co, «100% de nylon transparente de tela de malla transpirable tejido elástico,» 1017. [En línea]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/100-nylon-transparent-mesh-fabric-breathable_60721123304.html. [Último acceso: 5th January 2024].
- [64] Matmatch, «AA 7075 T6,» [En línea]. Available: <https://matmatch.com/es/materials/mitf3840-aa-7075-t6>. [Último acceso: 6th January 2024].
- [65] AZO materials, «Aluminum 7068 Alloy (UNS A97068),» [En línea]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8758>. [Último acceso: 8 January 2024].

- [66] AZO materials, «Acero aleado AISI 4130 (UNS G41300),» [En línea]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6742>. [Último acceso: 6th Jenuaty 2024].
- [67] AZO materials, «Carbon/Epoxy Composite Materials - Properties - Supplier Data by Goodfellow,» [En línea]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1995>. [Último acceso: 6 January 2024].
- [68] AZO material, «Titanium Alloys - Ti6Al4V Grade 5,» [En línea]. Available: Ti6AL4V. [Último acceso: 6 January 2024].
- [69] Q. Boehler, S. Abdelaizz y P. Poigent, «Parallel Singularities for the Design of Softening Springs Using Compliant Mechanisms,» ResearchGate, Montpellier, 2015.
- [70] D. Fullerton, «Boundless Physics,» CollegeSidekick, 29th November 2011. [En línea]. Available: <https://www.collegesidekick.com/study-guides/boundless-physics/hookes-law>. [Último acceso: 30th December 2023].
- [71] M. Asgari, E. A. Phillips, B. Dalton y D. Leen Crouch, «Design and Performance Evaluation of a Wearable Passive Cable-driven Shoulder Exoskeleton,» ReserachGate, 2020.
- [72] Gutekunst Federn Info, «Spring characteristic,» [En línea]. Available: <https://blog.federnshop.com/en/spring-characteristic/>. [Último acceso: 8 January 2024].
- [73] A. Ahmed y H. Zhou, «Synthesis of Nonlinear Spiral Torsion Springs,» International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Kingsville, Texas, 2014.

