



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Treball final de grau

Títol: Disseny i fabricació d'un braç articulat de mesura tridimensional per coordenades (BAMC)

Autor: Tuduri Benejam, Miquel

Data de presentació: Octubre del 2023

Cognoms: Tuduri Benejam

Nom: Miquel

Titulació: Grau en Enginyeria Mecànica

Pla: Grau en Enginyeria Mecànica

Director: Solé Rovira, Joan

Departament: Departament d'Enginyeria Mecànica

Qualificació del TFG

Tribunal

President/a: Sánchez Egea, Antonio José

Secretari/a: Magnusson Morer, Ingrid

Vocal: Salvado Cabre, Nativitat

Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals: Sí No

Resum

Els braços articulats de mesura per coordenades (BAMC) són un dels instruments metrològics més versàtils del mercat. Actualment, es troben implementats sobretot en centres de fabricació industrials per processos de control de qualitat o d'enginyeria inversa. La seva utilitat, junt amb prestacions elevades en termes de precisió i repetibilitat de mesura, provoquen que el seu preu de mercat sigui inassolible pel consumidor comú. Tenint això en ment, el present projecte es fonamenta en la necessitat de mesurar posicions relatives (distàncies i coordenades) entre punts de peces de dimensions mitjanes, com pugui ser el xassís d'una motocicleta. Per mitjà de la metodologia de gestió de projectes industrials *PREDICA*, aquest Treball de Final de Grau recull íntegrament el procés de disseny i fabricació d'un instrument de mesura tridimensional per coordenades, de tipologia de braç articulat, per obtenir un prototip funcional. La precisió de mesura a assolir ha de ser igual o inferior a la dècima de mil·límetre ($\pm 0,1$ mm).

Es partirà de l'Enginyeria d'Estratègia realitzant estudis de mercat, de materials, i de l'estat de l'Art. També s'introduiran possibles processos de fabricació i tecnologies implicades. Seguidament, es procedirà per mitjà de l'Enginyeria de Concepte a la planificació analítica i creativa; s'elaboraran una sèrie de propostes de disseny de braç de mesura en forma d'esbossos.

En l'Enginyeria de Detall següent, es desenvoluparà l'alternativa de braç elegida, elaborant-ne un model tridimensional amb software CAD (*SolidWorks*); és l'etapa del prototipat formal, en la que es genera el disseny modular, peça a peça. Cal tenir en compte la participació d'elements comercials i normalitzats. També es projecta el circuit electrònic en el que es basa el funcionament del braç. Aquest incorpora una sèrie d'elements; en destaquen els encòders òptics i un microcontrolador. Els encòders s'encarreguen de mesurar els desplaçaments angulars en les articulacions del braç; el microcontrolador executa el software de mesura i coordina l'acció dels perifèrics per, a través d'un procés de càlcul cinemàtic, deduir la posició del palpador situat al final del braç. Per incrementar la precisió de mesura dels encòders, es preveu la implementació d'un sistema d'augment de resolució per mitjà d'un mecanisme multiplicador cicloidal.

En l'etapa posterior, l'Enginyeria d'Execució, es possibilita el pas a la producció per mitjà del càlcul i la simulació. Això permet el correcte dimensionament dels elements mecànics. També es generarà la documentació tècnica necessària per a la fabricació i el recolzament les decisions preses.

Les tecnologies de fabricació majoritàries són la impressió tridimensional per deposició fosa (FDM), sobretot, i el mecanitzat per arrencament d'encenalls. En coherència a aquestes i als requeriments de disseny, el material majoritari serà el PLA (filament per impressió 3D). El PVC i l'alumini, ambdós en format tubular comercial, també s'utilitzaran recurrentment.

En l'etapa final, l'Enginyeria de Fabricació, es donarà la construcció de les peces necessàries per al funcionament del prototip. Paral·lelament a tot això, es portaran a terme un seguit de processos experimentals (assaigs) per contrastar el dimensionament i les propietats de materials i unitats de disseny modular.

En conclusió, el present projecte ha esdevingut una aplicació directa i tangible dels coneixements tècnics adquirits per l'alumne durant la seva formació. Alhora, representa un procés d'autoaprenentatge immens. Ha permès agafar consciència de la complexitat rere el disseny d'un producte. Tanmateix, tot i la obtenció del prototip de braç funcional, les precisions de mesura assolides disten molt de l'objectiu. Un dels principals motius són les toleràncies de fabricació de difícil mesura i control derivades de la impressió FDM. La voluntat d'optimització màxima de costos, reflectida en components electrònics de baix rendiment també ha influenciat aquest fet. Alhora, el propi software de mesura, desenvolupat des de zero i partint d'una base de coneixements limitada, presenta ineficiències.

Paraules clau

- Metrologia
- Instrument de mesura
- Braç de mesura tridimensional
- Impressió 3D
- Mecanisme cicloidal
- Software de mesura
- Encóder
- Cinemàtica de mecanismes
- Mètode d'elements finits

Abstract

Coordinate measuring arms (CMA) are one of the most versatile metrological instruments on the market. Currently, they are mainly used in industrial manufacturing for quality control processes or reverse engineering. Their utility, combined with high-performance in terms of measurement precision and repeatability, makes their price unaffordable for the average consumer. Having this in mind, this project is based on the need to measure relative positions (distances and coordinates) between points on medium-sized parts, such as a motorcycle chassis. Through the *PREDICA* industrial project management methodology, this document shows the design and manufacturing process of a three-dimensional coordinate measuring instrument (articulated arm type) to obtain a functional prototype. The precision to be achieved must be equal to or less than one-tenth of a millimetre (± 0.1 mm).

The project will start with Strategic Engineering, conducting market studies and material research. Possible manufacturing processes and associated technologies will also be introduced on it. Subsequently, Concept Engineering will move to the analytical and creative planning phase, generating different design proposals for the measuring arm in the form of sketches. In the detailed engineering phase, the chosen arm alternative will be developed, creating a three-dimensional model using a CAD software (*SolidWorks*); this is the formal prototyping stage where the modular design is created, piece by piece. Commercial and standardized components will also be incorporated. The electronic circuit on which the arm's operation is based on will also be designed. This includes several elements, with optical encoders and a microcontroller being the most prominent ones. The encoders measure angular displacements at the arm's joints, while the microcontroller runs the measurement software and coordinates the action of peripherals to deduce the position of the probe at the end of the arm. To increase the measurement precision of the encoders has been planned the implementation of a resolution enhancement mechanism through a cycloidal multiplier. In the subsequent Execution Engineering stage, production becomes possible through calculation and simulation. This allows for the proper sizing of mechanical components. The necessary technical documentation for manufacturing will also be generated. Another goal is the full support and validation of the decisions made with sufficient information and documentation. The primary manufacturing technologies are fused deposition modelling (FDM), particularly, and machining. In line with these and the analysed design requirements, the predominant material will be PLA (3D printing filament). PVC and aluminium, both in tubular commercial form, will also be used. In the final Manufacturing Engineering stage, the construction of the necessary components for the prototype's operation will take place. In parallel, a series of experimental processes (tests) will be carried out to verify the sizing and properties of materials and modular design units.

In conclusion, this project has become a direct and tangible application of the technical knowledge acquired by the student during their university learning. At the same time, it represents an immense self-learning process. It has allowed the understanding of the complexity behind the design and realization of a product. However, despite obtaining a functional arm prototype, the measurement accuracies achieved are far from the target. One of the main reasons is the challenging-to-measure and control manufacturing tolerances resulting from FDM printing. The desire for maximum cost optimization, reflected in low-performance electronic components, has also influenced this. Likewise, the measurement software itself, developed from scratch and based on limited knowledge, presents inefficiencies.

Key words

- Metrology
- Measuring instruments
- Articulated measuring arm
- 3D Printing
- Cycloidal mechanism
- Measuring software
- Encóder
- Kinematics
- Finite Elements Method

Sumari

Resum	3
<i>Abstract</i>	5
Sumari.....	7
Sumari de figures	11
Glossari d'abreviatures.....	13
Glossari de termes.....	14
Metrologia.....	14
Cinemàtica i geometria	14
Impressió 3D.....	15
Resistència de materials	15
Electrònica.....	16
1. Memòria.....	17
1.1. Memòria descriptiva	17
1.1.1. Introducció.....	17
1.2.1. Proposta.....	17
1.3.1. Objectius	18
1.1.4. Metodologia i format de la memòria	19
1.1.5. Missió i visió	20
1.1.6. Cronologia i planificació del projecte	20
1.2. Estudi tecnològic.....	21
1.2.1. Metrologia, magnituds i unitats.....	21
1.3.1. Introducció a les màquines de mesura per coordenades (MMC).....	24
1.3.2. Màquines de mesura per coordenades no cartesianes.....	34
1.3.2. Mecanisme cicloidal	38
1.4. Estudi de mercat	40
1.4.1. <i>Metrologia Sariki S.A.</i>	40
1.4.2. <i>FARO MetrologyWorks, Inc.</i>	41
1.4.3. Anàlisi de mercat aplicat al projecte	44
1.5. Estudi de processos.....	46
1.5.1. Impressió tridimensional	46
1.5.2. Mecanitzat per arrencament d'encenalls.....	52
1.6. Estudi de materials.....	57
1.6.1. Requeriments i condicionants del disseny.....	58
1.6.2. <i>Ansys GRANTA EduPack</i>	62
1.6.3. Selecció final de materials	65

2.	Disseny del braç articulat de mesura.....	75
2.1.	Anàlisi de la problemàtica i concepte inicial.....	75
2.2.	Esbossos i disseny inicial	76
2.2.1.	Alternativa de disseny 1.....	76
2.2.2.	Alternativa de disseny 2.....	78
2.2.3.	Alternativa de disseny 3.....	79
2.2.4.	Elecció final de l'alternativa de disseny	80
2.3.	Disseny modular mecànic.....	80
2.3.1.	Articulacions.....	82
2.3.2.	Manipulador i sistema d'adquisició de punts (SAP)	89
2.3.3.	Estructura tubular	92
2.3.4.	Base	94
2.3.5.	Sistema d'acoblament del microcontrolador	96
2.4.	Disseny modular electrònic	98
2.4.1.	Microcontrolador	98
2.4.2.	Encòder òptic	99
2.4.3.	Elements de control	100
2.4.4.	Connexions entre components	101
2.5.	Desenvolupament del software de mesura	103
2.5.1.	Conceptes previs i entorn de programació <i>Arduino</i>	103
2.5.2.	Cinemàtica del braç articulat	105
2.5.3.	Cos del programa	113
3.	Disseny al detall.....	128
3.1.	Selecció de components.....	128
3.1.1.	Components normalitzats del muntatge	128
3.1.2.	Components estructural de fabricació externa	129
3.1.3.	Components del circuit electrònic	130
3.2.	Descripció del muntatge del BAMC	132
3.2.1.	Unions mecàniques semi-permanents	133
3.2.2.	Unions mecàniques per pressió	133
4.	Plànols.....	135
4.1.	Llistat de plànols	135
4.2.	Plànol de conjunt	136
4.3.	Plànols individuals.....	137
4.4.	Llistat de peces.....	140
4.5.	Esquema de muntatge del circuit electrònic	159

5.	Plec de Condicions.....	160
5.1.	Normativa envers els braços de mesura	160
5.2.	Normativa tècnica particular	160
5.2.1.	Fabricació per impressió 3D (FDM)	161
5.2.2.	Fabricació per mecanitzat.....	161
5.2.3.	Components de fabricació externa	161
5.3.	Adaptació de la normativa a l'abast del projecte	162
5.4.	Modelat per deposició fosa (FDM)	163
5.4.1.	Tipologia d'impressora FDM	163
5.4.2.	Preparació de la impressora	165
5.4.3.	Correcció dels paràmetres d'impressió (calibratge).....	167
5.4.5.	Paràmetres i temps d'impressió.....	172
5.5.	Operacions d'acabat	173
5.5.1.	Operacions posteriors al mecanitzat.....	173
5.5.2.	Operacions posteriors a la impressió 3D	174
5.6.	Procediment de muntatge del BAMC	175
5.6.1.	Muntatge mecànic.....	175
5.6.2.	Muntatge electrònic	177
6.	Pressupost.....	180
7.	Càlculs justificatius.....	184
7.1.	Disseny del mecanisme cicloidal.....	184
7.1.1.	Paràmetres característics d'un mecanisme cicloidal.....	184
7.2.	Dimensionament d'elements mecànics	188
7.2.1.	Incís envers la fabricació per FDM.....	188
7.2.2.	Presentació de la situació d'ús.....	189
7.2.4.	Dimensionament de l'articulació	190
8.	Fase experimental	208
8.1.	Antecedents de la resistència en la impressió per FDM	208
8.2.	Determinació dels paràmetres de farciment òptims	209
8.2.1.	Objectius	210
8.2.2.	Planificació	210
8.2.3.	Muntatge experimental.....	211
8.2.4.	Resultats	212
8.2.5.	Conclusions	213
8.3.	Assaig de fallada estàtica en l'articulació	215
8.3.1.	Objectius	215

8.3.2.	Planificació	215
8.3.3.	Muntatge experimental.....	219
8.3.4.	Resultats	219
8.3.5.	Conclusions	221
8.4.	Determinació del parell resistent articular.....	222
8.4.1.	Objectius i planificació.....	222
8.4.2.	Resultats	222
8.4.3.	Conclusions	223
8.5.	Assaig computacional estàtic en l'estructura tubular	223
8.5.1.	Objectius	223
8.5.2.	Planificació i hipòtesis.....	224
8.5.3.	Càlculs previs.....	224
8.5.4.	Aplicació del Mètode dels Elements Finites	227
8.5.5.	Resultats	228
8.5.6.	Conclusions	230
9.	Resultats del projecte	231
10.	Conclusions del projecte	234
10.1.	Línies de treball futur	236
	Bibliografia	238
	Annexes	240
	Sumari d'annexes	240
	Annex 1 – Diagrama de Gantt	241
	Annex 2 – Pinmap (schematics) M5Core2	242
	Annex 3 – Plànol M5Core2.....	243
	Annex 4 – Plànol encóder òptic LPD3806-600BM-G5-24N.....	244
	Annex 5 – Software de mesura (codi).....	245

Sumari de figures

Fig. 1 Cotes en la metrologia.....	21
Fig. 2 Naturalesa de la mesura per coordenades.....	25
Fig. 3 Sistemes d'una màquina CMM	26
Fig. 4 Els sistemes de coordenades entre peça i màquina acostumen a ser diferents	27
Fig. 5 Tipologies estructurals de màquines CMM	28
Fig. 6 Estructura típica d'un BAMC	36
Fig. 7 Muntatge d'un encòder òptic.....	37
Fig. 8 Senyals de sortida d'un encòder òptic de 2 canals	37
Fig. 9 Parts d'un mecanisme cicloidal genèric.....	38
Fig. 10 Geometria bàsica d'un mecanisme cicloidal.....	39
Fig. 11 Gràfiques d'anàlisi dels models de BAMC en el mercat	45
Fig. 12 Esquema del procés d'impressió FDM.....	47
Fig. 13 Flux de treball típic en la impressió per FDM	48
Fig. 14 Procés de mecanitzat per tornejat	52
Fig. 15 Tallat amb serra de cinta automàtica	54
Fig. 16 Parts funcionals d'un torn convencional	56
Fig. 17 Diagrama de refrentat (esque.) i xamfranat (dreta)	56
Fig. 18 Procés de trepanat	57
Fig. 19 Classificació gràfica de materials segons la relació densitat - elasticitat extreta del GRANTA EduPack.....	62
Fig. 20 Posició concreta del PVC en la gràfica anterior	63
Fig. 21 Posició dels plàstics en la gràfica densitat - elasticitat	63
Fig. 22 Posicionament de les diferents classes de polímers entorn les propietats avaluades	64
Fig. 23 Posició de l'alumini en la gràfica densitat - elasticitat.....	65
Fig. 24 Esbós (I) de proposta de disseny de BAMC.....	77
Fig. 25 Esbós (II) de proposta de disseny de BAMC.....	78
Fig. 26 Esbós (III) de proposta de disseny de BAMC.....	79
Fig. 27 Disseny modular (SolidWorks) final del BAMC projectat	82
Fig. 28 Posicionament de les unitats articuladors del BAMC projectat.....	85
Fig. 29 Detalls constructius de les articulacions C (dalt) i B (baix)	86
Fig. 30 Detalls constructius de les articulacions B (dalt) i A (baix)	87
Fig. 31 Detalls constructius de l'articulació D	88
Fig. 32 Detalls constructius de l'articulació E	89
Fig. 33 Detalls i vistes del manipulador (SAP)	91
Fig. 34 Vista detallada d'un dels segments tubulars (B - C)	94
Fig. 35 Detall de la base del BAMC.....	95
Fig. 36 Detalls constructius de la carcassa del microcontrolador	97
Fig. 37 Microcontrolador M5Core2 amb algunes de les seves propietats indicades.....	99
Fig. 38 Encòder òptic LPD3806-600B-G5-24N.....	100
Fig. 39 Esquema de connexió de polsador a entrada digital amb resistència Pull-Down	102
Fig. 40 Estructura habitual del codi en l'entorn Arduino	104
Fig. 41 Esquema del procés resolutori cinemàtic directe i invers	107
Fig. 42 Caracterització cinemàtica del BAMC projectat.....	108
Fig. 43 Anàlisi cinemàtica de la geometria lateral (pla XY)	109
Fig. 44 Anàlisi cinemàtica superior (pla XY)	110
Fig. 45 Eixos de rotació de les articulacions del BAMC.....	111

Fig. 46 Pantalles inicials del software de mesura.....	116
Fig. 47 Pantalla del menú principal del software de mesura	116
Fig. 48 Menús de mesura de punts (esquerra) i distàncies (dreta) del software de mesura	117
Fig. 49 Pantalles del procés de mesura de punts I	117
Fig. 50 Pantalla final del procés de mesura	118
Fig. 51 Notificació d'error en la targeta microSD	119
Fig. 52 Matriu generada en el document de punts (coordenades).....	121
Fig. 53 Matriu generada en el document de distàncies	121
Fig. 54 Directori generat automàticament en la targeta microSD	122
Fig. 55 Exemplificació gràfica del debounce amb un interruptor	125
Fig. 56 Pinmap de l'M5Core2	179
Fig. 57 Diagrama de forces simplificat sobre el BAMC	189
Fig. 58 Accions en el si de l'articulació cicloidal	191
Fig. 59 Vista lateral de l'articulació cicloidal amb accions sobre els passadors	193
Fig. 60 Diagrama d'accions sobre el passador	194
Fig. 61 Diagrama de forces sobre l'eix excèntric.....	200
Fig. 62 Disposició dels rodaments de l'articulació i càrregues que els afecten	205
Fig. 63 Situació aplicada en l'assaig per MEF	224

Glossari d'abreviatures

SI: Sistema Internacional d'Unitats

CGPM: Conferència General de Peses i Mesures

MMC: màquina de mesura (tridimensional) per coordenades

BAMC: braç articulat de mesura (tridimensional) per coordenades

VUT: volum útil de treball o mesura

SAP: sistema d'adquisició de punts

CN: control numèric

CAD: *computer-aided design*

CAM: *computer-aided manufacturing*

FDM: modelat per deposició fosa (*fused deposition modeling*)

PLA: àcid polilàctic

PVC: policlorur de vinil

ABS: acrilonitril butadiè estirè

TPU: poliuretà termoplàstic

LED: *light emitting diode*

STEP: *standard for the Exchange of product data*

STL: *standard triangle language*

UNE - AENOR: Associació Espanyola de Normalització i Certificació

ISO: *International Organization for Standardization*

DIN: Institut Alemany per la Normalització (*Deutsches Institut für Normung*)

MEF: mètode dels elements finits

LCD: *liquid-crystal display*

CPU: unitat central de processament (*central processing unit*)

SR: sistema de referència

Glossari de termes

Metrologia

- **Metrologia:** és la ciència que estudia i defineix les magnituds físiques, les mesures i les seves unitats.
- **Metrotècnia:** és la tecnologia o el conjunt de tècniques que estudia les mesures; és l'aplicació de la metrologia a la tècnica, doncs.
- **Cota nominal:** és la mida teòricament definida pel disseny d'una característica dimensional o geomètrica d'una peça.
- **Cota efectiva:** és la mida real que fa una característica dimensional o geomètrica d'una peça.
- **Tolerància de fabricació:** és la diferència dimensional permissible i degudament indicada entre la cota nominal teòrica i la cota efectiva real d'una característica dimensional o geomètrica d'una peça.
- **Magnitud:** és qualsevol propietat d'un cos, substància o fenomen físic susceptible de ser distingit qualitativament (classificar) i de determinar-se quantitativament (mesurar), de ser mesurats i comparats, doncs.
- **Unitat:** és una magnitud particular, definida i adoptada per conveni, amb la que es comparen altres magnituds de la mateixa naturalesa. El metre (m) o el quilogram (kg) en són exemples clars.
- **Instrument de mesura:** conjunt d'elements que fan possible realitzar una mesura i que estan situats entre la peça a mesurar i el resultat final o valor mesurat.
- **Cadena de mesura:** seqüència de captador, amplificador, indicador i registrador que possibilita la mesura. El primer ens capta la senyal d'entrada i la transforma en una senyal susceptible de ser tractada; l'amplificador augmenta el rang de la senyal; l'indicador presenta la senyal augmentada en forma perceptible per l'operador; finalment, el registrador, permet conservar el resultat de la mesura.
- **Volum útil de treball (VUT):** també conegut com volum útil de mesura, es podria definir com la regió tridimensional de l'espai on una màquina de mesura pot efectuar mesures; aquesta regió pot variar en un interval comprès des de 1 dm^3 fins a diverses desenes de m^3 , és de geometria variable i depèn directament de l'arquitectura de la màquina i de la seva mobilitat.

Cinemàtica i geometria

- **Membre cinemàtic:** és un element rígid i idealitzat del mecanisme que té moviment relatiu respecte de la resta d'elements.
- **Parell cinemàtic:** és l'enllaç entre dos membres cinemàtics d'un mecanisme causat pel contacte directe entre ells i que permet el moviment relatiu entre aquests.

- Mecanisme espacial: les trajectòries dels punts tenen un caràcter tridimensional i no és pla, doncs.
- Cadena cinemàtica oberta: és una cadena cinemàtica que no té cap anell, pel que alguns dels membres estan units a un sol element i no units dos a dos.
- Trajectòria: és la corba que resulta de la unió seqüencial dels punts de pas d'un punt concret del mecanisme.
- Cinemàtica: branca de la mecànica clàssica que estudia les lleis del moviment dels cossos sense tenir en compte les causes que el produeixen; és l'estudi relatiu del moviment.
- Vector: ens matemàtic que es pot representar per mitjà d'un segment de recta orientat dins de l'espai euclidià i compta amb mòdul (longitud), direcció (recta de l'espai que segueix) i sentit com a magnituds característiques fonamentals de la seva definició.
- Vector unitari: vector el mòdul del qual és igual a la unitat.
- Ortogonal: qualitat d'un sistema de referència, vector, conjunt de vectors o element geomètric qualsevol de perpendicularitat geomètrica respecte d'un altre element. De fet, en l'espai euclidià convencional, el terme perpendicular és sinònim del terme ortogonal.
- Ortonormal: qualitat d'un sistema, vector o conjunt de vectors adquirida quan és ortogonal (perpendicular) a un altre conjunt i la norma (mòdul) de cadascun dels seus vectors integrants és igual a la unitat (vector unitari).

Impressió 3D

- Modelat per deposició fosa (FDM): tècnica de fabricació additiva que genera objectes per superposició de capes successives de material polimèric fos.
- *Warping*: fenomen que succeeix durant la impressió 3D FDM quan les capes d'objectes impresos es refreden i es contrauen de manera desigual. Això pot provocar que les cantonades de l'objecte es trenquin o es deformin, ja que es corben cap amunt o cap avall.
- *Nozzle* (boquilla): part d'una impressora 3D que expulsa i fon el filament plàstic. Determina el diàmetre de les capes i influeix en la resolució (detall) de la peça impresa.
- *Infill*: es refereix a tots els paràmetres d'impressió que tenen a veure amb el farciment estructural de les peces fabricades per impressió 3D. Inclou factors com la densitat de rebliment, l'orientació de les capes i el patró de farciment, entre altres.

Resistència de materials

- Resistència mecànica: concepte general que engloba la capacitat d'un material per resistir càrregues sense experimentar deformacions desmesurades o la fallada.

- Resistència a la fatiga: és la capacitat d'un material de resistir la fallada sota càrregues repetides cícliques. Aquesta propietat resulta especialment rellevant en aplicacions on l'element està sotmès a càrregues oscil·lants constants, com ara en estructures o components mecànics mòbils.
- Resistència a tracció: és la capacitat d'un material per resistir forces aplicades de forma longitudinal o paral·leles al seu eix axial.
- Resistència a l'impacte: és la capacitat d'un material per resistir cops o càrregues dinàmiques momentànies. S'utilitza per avaluar com un material es comporta quan s'exposa a forces de col·lisió o impacte.
- Mòdul de Young: és una propietat que mesura la rigidesa d'un material. Indica la variació de la longitud (deformació) sota una càrrega de tracció o compressió pura. Un Mòdul de Young alt significa que el material és rígid i que no pateix deformacions fàcilment.
- Límit elàstic: és la màxima càrrega o tensió que un material pot suportar sense experimentar deformacions plàstiques (permanents). És un dels punts crítics en la corba esforç – deformació.
- Fragilitat: és la tendència d'un material a trencar-se o fracturar-se sense deformació significativa abans d'arribar al seu límit de resistència. Els materials fràgils solen trencar-se de manera ràpida i sense deformació.

Electrònica

- *Debounce*: es refereix al procés d'eliminar o reduir les oscil·lacions o rebots en un senyal elèctric quan es prem o allibera un interruptor o botó. Aquesta oscil·lació pot ser un problema en circuits digitals, ja que pot provocar un comportament erràtic. Per això, es fan servir elements com condensadors o xips especials per a estabilitzar el senyal i assegurar una única transició quan s'activa o desactiva l'interruptor.
- *Polling*: és una tècnica utilitzada en la programació que implica que un controlador o sistema escaneja o interroga regularment perifèrics, variables o components connectats per veure si hi ha canvis o noves dades disponibles. En l'entorn de programació, això es fa mitjançant bucles que verifiquen estats o dades dels perifèrics en intervals regulars. És una manera de gestionar l'entrada i sortida de dades sense haver d'esperar notificacions actives, com s'utilitza en altres mètodes com les interrupcions.
- Interrupció: és un mecanisme important en electrònica i programació que permet que un microcontrolador o una unitat central de processament (CPU) respongui immediatament a un esdeveniment o senyal extern sense haver de verificar contínuament l'estat d'aquest esdeveniment. Aquest mecanisme és útil per gestionar tasques crítiques o temporals.

1. Memòria

1.1. Memòria descriptiva

1.1.1. Introducció

La present memòria recull un projecte tècnic d'enginyeria sorgit i desenvolupat en el sí de l'Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG), facultat depenent de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) per materialitzar el Projecte Final d'Estudis de l'autor, estudiant del Gran en Enginyeria Mecànica impartit en l'esmentat centre. La seva voluntat ha estat la d'abocar i plasmar en aquestes pàgines gran part dels coneixements tècnics adquirits al llarg dels cursos en una aplicació pràctica real. S'ha intentat anar una mica més enllà de la dimensió teòrica i analítica per passar a l'execució material tot obtenint un resultat funcional, més meritori i amb un major recorregut. Sense anar més enllà, s'intenta replicar el còmput d'activitats que desenvolupa la figura de l'enginyer en l'àmbit industrial envers el desenvolupament d'un aparell. Així doncs, aquest document recull el procediment de concepció, disseny, fabricació, construcció i assaig d'un prototip de braç articulat de mesura tridimensional per coordenades (BAMC), des de les fases creatives inicials fins a la posada en marxa del mateix.

L'execució i la gestió del projecte s'han efectuat seguint la metodologia *PREDICA*, procediment habitualment aplicat en la gestió de productes en l'àmbit industrial. És per això que es desenvoluparan els camps de l'enginyeria d'estratègia i de concepte inicials, l'enginyeria de detall, d'execució i de fabricació; deixant de banda la comercialització com a tal – l'abast del projecte finalitza en l'obtenció d'un prototip funcional – també es tindrà en compte la gestió del cicle de vida de l'objecte d'estudi.

Com a punt de partida, s'analitzarà l'estat de l'art i la tècnica actuals en l'àmbit de les màquines de mesura per coordenades (MMC). També es desenvoluparan els respectius estudis de materials, processos de fabricació i dimensionament dels elements funcionals dissenyats. Tanmateix, la planificació i execució del projecte, amb les seves corresponents etapes, s'anirà desglossant progressivament amb el pas dels apartats de la present memòria.

Resumidament, i donant pas al cos del document, aquest projecte d'enginyeria es fonamenta en tres aspectes principals per materialitzar la idea inicial proposada en forma de model prototípic funcional; aquests tres àmbits d'acció són la gestió del què es farà, la documentació que recull les condicions i la metodologia utilitzades i, finalment, la planificació d'aquestes.

1.2.1. Proposta

El projecte desenvolupat en aquest document tècnic es centra en el desenvolupament del disseny, la fabricació i l'assaig funcional d'un prototip braç articulat de mesura tridimensional per coordenades (BAMC). Es tracta d'una de les variants més versàtils de màquina de mesura per coordenades (MMC), aparells àmpliament utilitzats en els processos industrials, sobretot en l'àrea de qualitat i control. Aquesta és, doncs, el concepte general inicial i l'objectiu final sobre la que es construeixen les accions descrites en el transcurs d'aquest document.

Tanmateix, tota acció impulsada des de l'àmbit de l'enginyeria busca complaure una necessitat, solucionar una problemàtica utilitzant els mitjans tècnics, materials i humans disponibles. La necessitat que busca satisfer el treball realitzat sorgeix del requeriment d'un aparell mòbil, adaptable i precís per mesurar in situ característiques dimensionals i/o de forma en peces i elements físics ja fabricats. La utilitat d'aquestes mesures ha de servir per, posteriorment a la seva realització, poder dissenyar i fabricar altres elements que es puguin acoblar, relacionar i integrar amb els esmentats anteriorment. Concretament, i en forma d'exemple clarificador, la idea primitiva que

motiva l'inici d'aquest projecte apareix amb el professor director del mateix; aquest, en el desenvolupament d'un projecte personal, es veu amb la necessitat de mesurar de forma fiable la posició de diferents punts del xassís d'una motocicleta (ancoratges dels amortidors, articulacions de direcció, etc.) per obtenir-ne un model tridimensional a partir del qual dissenyar certs elements funcionals que posteriorment s'hi instal·laran.

D'aquesta forma, es proposa obtenir un prototip funcional de BAMC amb una exactitud, precisió i reproductibilitat estables, conegudes i suficients com per assegurar una aplicabilitat industrial vàlida. En última instància, el funcionament d'aquest aparell de mesura ha de desembocar en l'obtenció d'un arxiu que reculli les coordenades relatives envers la posició dels diferents punts mesurats. Tot i que l'abast del projecte arriba fins a aquest punt, la utilitat final recau en que aquest text pugui ser introduït com una matriu de punts en un software de modelatge tridimensional per a generar-ne la geometria corresponent.

Per altra banda, el mercat es troba farcit de distribuïdors, fabricants i models de màquines de mesura tridimensional la funcionalitat de les quals ja dona resposta a la necessitat aquí exposada. Tanmateix, el valor que busca generar el present projecte recau en l'obtenció d'una màquina de mesura tridimensional en format de braç articulat amb unes prestacions funcionals i tècniques vàlides per al seu ús industrial sense sacrificar-ne els aspectes de l'accessibilitat material i econòmica, tot fent ús de tecnologies i materials de fabricació de fàcil accés.

1.3.1. Objectius

Un cop presentada la proposta de la que parteix el projecte, cal definir un seguit d'objectius inicials que esdevindran fites a assolir durant el desenvolupament del mateix. Així doncs, aquests marcaran la dinàmica i la direcció de la tasca d'enginyeria tot acotant el recorregut i la dimensió de la mateixa, i definint les característiques funcionals i de disseny generals a les que es vol arribar.

- Obtenció d'un prototip de màquina funcional de mesura tridimensional per coordenades de tipologia de braç articulat (BAMC) amb aplicabilitat industrial.
- Construcció i manufactura dels elements funcionals i les peces necessàries per al funcionament del prototip sense la intervenció d'agents fabricants externs.
- Recolzament i contrastació de totes les decisions preses durant el desenvolupament del projecte amb la informació i/o documentació suficient.
- Assoliment d'una precisió de mesura inferior o igual a la dècima de mil·límetre ($\pm 0,1$ mm).
- Realització del procediment complet de disseny, dimensionament i fabricació dels elements que formen l'aparell seguint la metodologia de gestió de projectes *PREDICA* i cadascuna de les seves fases.
- Obtenció d'un arxiu final en format text amb les coordenades relatives respecte d'un origen definit dels punts d'interès mesurats per mitjà del funcionament del braç de mesura.
- Obtenció de l'aparell sota una condicions de costos similars o inferiors a les ofertes en el mercat sense comprometre'n el funcionament i la precisió.

- Annexió i compliment de les normatives específiques vigents del sector de les màquines de mesura i la metrologia en termes de disseny i funcionament.
- Inclusió dels conceptes de sostenibilitat, accessibilitat i disseny circular en la mesura que el projecte ho permeti.
- Realització d'un pressupost detallat i realista que reculli els costos de tot el projecte d'enginyeria desenvolupat.
- Obtenció dels recursos documentals (plànols, plec de condicions, etc.) necessaris per a la reproductibilitat del prototip funcional obtingut.

1.1.4. Metodologia i format de la memòria

Com ja s'ha mencionat de forma introductòria, tot el desenvolupament i la gestió del present projecte s'ha efectuat seguint la metodologia *PREDICA*, aplicada habitualment en el disseny de productes en l'àmbit industrial. Aquesta pràctica sorgeix en el marc del *Proyecto PREDICA (Promoción y estudio para un diseño industrial competitivo en Asturias y otras CCAA)*, desenvolupat per la *Fundación Prodimtec* a finals de la dècada passada. Aplicant-la es busca implementar el disseny com a principal agent generador de valor en tots els àmbits d'una estratègia empresarial i productiva industrial qualsevol, no només en la dimensió del producte. Alhora, fa per quantificar aquest efecte i analitzar la millora a nivell funcional, visual, econòmic i un llarg etcètera.

Aquesta guia de procediment compta amb set etapes definides, de les quals se'n tractaran de forma específica sis; l'enginyeria d'estratègia i de concepte són les dues fases inicials, on es planifica la resolució a la necessitat plantejada a partir de diverses possibles solucions en forma de braços articulats de mesura tridimensional; aquestes etapes venen seguides per l'enginyeria del detall, la d'execució i la de fabricació, trams del projecte en el que es determina i desenvolupa l'alternativa de disseny elegida, des dels esbossos inicials fins a l'obtenció d'un prototip funcional apte per a ser extret al mercat, generant-se la conseqüent documentació que en permet la fabricació. Deixant de banda la comercialització com a tal, també es tindrà en compte el cicle de vida de l'objecte d'estudi, la setena i última etapa del mètode, en base a la consciència material i la gestió de l'aparell un cop s'ha acabat la seva vida útil.

Per altra banda, l'estructuració i el contingut documental de la memòria s'han elaborat seguint la Norma UNE-157001:2002 (AENOR, 2002) envers *Criterios generales para la elaboración de proyectos*. Fent ús d'aquest estàndard, i tal i com s'ha pogut observar en el *Sumari*, el text es divideix en deu grans apartats o carpetes diferents (Memòria, Disseny del braç articulat, Plànols, Plec de condicions, Pressupost, Càlculs justificatius, Fase experimental, Conclusions, Bibliografia i Annexes, en aquest ordre). D'aquesta forma, es recull i organitza de forma clara i entenedora tota la informació i els coneixements necessaris per reproduir la tasca desenvolupada en el projecte.

A banda d'això, cal tenir en compte que aquesta memòria no deixa de ser un document avaluatiu i curricular. Com a tal, pot acabar en mans de tipologies diverses de lectors, amb nivells de coneixements tècnics i específics envers les temàtiques tractades igual de diversos. Amb l'objectiu de facilitar la comprensió de les matèries treballades, l'autor ha incorporat el corresponent *Glossari d'abreviatures i termes* incloent els conceptes tècnics més específics. Igualment, tota aquella informació extreta directament d'alguna font bibliogràfica va acompanyada pel corresponent autor i any de publicació, entre parèntesis, correlacionant-la amb el recull de texts consultats degudament mencionats en l'apartat *Bibliografia* per si se'n vol obtenir un major aprofundiment. També resultarà

evident durant el transcurs de la lectura la inclusió, en diverses ocasions, dels mots i termes tècnics en la llengua anglesa originària. Aquests s'incorporen entre parèntesis, acompanyant els tecnicismes en català per a dotar d'un major recorregut certs conceptes i relacionar-los amb els texts de referència consultats.

Així mateix, quan l'autor ho ha considerat oportú, ha inclòs un seguit de comentaris a peu de pàgina, degudament referenciats per un superíndex numèric, que inclouen aclariments rellevants o referències a altres apartats que contenen informació ampliada del tòpic senyalat. La memòria està estructurada per a desenvolupar-se mitjançant una lectura lineal, mantenint la coherència formal que un document d'aquestes característiques requereix. Tanmateix, s'estableixen relacions conceptuals entre apartats allunyats per mitjà de referències i comentaris. Així es dota d'un sentit general de globalitat al projecte i es genera un flux multidireccional d'informació – la tasca d'enginyeria portada a terme a la realitat no ha estat, en cap cas, una successió ordenada d'esdeveniments exitosos –.

1.1.5. Missió i visió

Ja s'ha mencionat que aquest projecte és el resultat de la tasca desenvolupada en el marc del Treball Final d'Estudis del Grau en Enginyeria Mecànica cursat per l'autor. Tanmateix, el mòbil o la motivació última que ha impulsat l'execució del treball recollit en la present memòria va una mica més enllà; en ella es busca demostrar la validesa i utilitat del possible títol universitari que possibilita i acompanya per mitjà d'una aplicació verídica i pragmàtica de les capacitats, coneixements i atribucions suposades a la figura de l'enginyer industrial mecànica. Així doncs, a partir d'una necessitat metrològica real i contrastada, es desenvolupa tot un seguit d'accions metodològiques amb l'objectiu de solucionar-la sense recórrer directament a les alternatives disponibles en el mercat i obtenint un resultat tangible, avaluable de forma quantitativa per mitjà d'assaigs. És per això que la solució oferta per aquest projecte s'enfoca des de la senzillesa i l'austeritat que implica la tasca d'enginyeria unipersonal, els recursos amb els que es compten i el context en el que es produeix.

En aquesta mateixa línia, el projecte busca la comunió entre els aspectes mecànics i constructius, de fabricació, disseny i dimensionament, amb una part de programació funcional i muntatge electrònic; aquesta segona vessant s'allunya dels camps d'acció habituals – i còmodes – de l'Enginyeria Mecànica però resulten un component fonamental en el desenvolupament de les tecnologies recents i futures que s'estenen molt més enllà de l'abast d'aquesta memòria.

Per altra banda, el fet que la memòria englobi tot el procés de concepció, gestió i materialització possibilita un referent documental realista envers els processos de creació industrials d'un producte o ens funcional qualsevol, i les respectives tasques desenvolupades per l'enginyer. És precisament això el que s'ha volgut replicar en l'escala i la mesura que han estat possibles.

1.1.6. Cronologia i planificació del projecte

En tot procés industrial es produeix una interrelació entre les diferents activitats (dependència de fabricació, un procés necessita que abans s'hagi realitzat una operació per a poder continuar amb la següent, dependència dels mitjans humans, proveïdors, etc.). Per controlar d'una forma gràfica l'estat en què es troba el projecte en cada moment i també la forma d'obtenir el màxim rendiment al temps dedicat a la seva elaboració, cal implementar algun sistema de control per la planificació. Aquest ajudarà a prendre decisions i a minimitzar la incertesa. Alhora, la representació gràfica permet tenir a la vista totes les activitats i les seves interrelacions.

La distribució temporal del desenvolupament de les diferents fases de la metodologia *PREDICA* aplicada en el present projecte s'han planificat des d'un principi. L'execució del mateix ha vingut determinada per una planificació cronològica pròpia que es planteja aquí per mitjà d'un diagrama de Gantt; es tracta d'una eina àmpliament utilitzada en l'àmbit industrial per a l'organització temporal. El diagrama d'organització (*Annex 1 – Diagrama de Gantt*) s'ha incorporat un cop finalitzat el projecte, amb les respectives correccions i ajusts envers la gestió real del temps destinat a cadascuna de les tasques detallades.

1.2. Estudi tecnològic

Durant el transcurs d'aquest projecte es tractaran una sèrie diversa de camps tecnològics, amb els respectius conceptes teòrics i tecnicismes. Amb l'objectiu de facilitar al lector la comprensió del vocabulari i l'enteniment de la matèria, en els següents apartats s'introduiran els conceptes més importants de cadascun dels grans àmbits tècnics desenvolupats. Així es busca contextualitzar i donar una imatge global clarificadora dels termes i procediments que aniran apareixen.

1.2.1. Metrologia, magnituds i unitats

De primera mà, cal introduir breument el camp funcional o tecnològic de l'ens que es dissenya en el present projecte, el de les màquines de mesura tridimensionals per coordenades (MMC). Alhora, resulta interessant repassar superficialment els conceptes que engloba la metrologia com a branca científica d'estudi i que compten amb una relació directa amb les màquines de mesura [1].

1.2.1.1. Metrologia i metrotècnia

Es pot definir la *metrologia* com la ciència que estudia i defineix les magnituds físiques, les mesures i les seves unitats. Aquesta té tantes branques com magnituds diferents hi ha; tanmateix, la vessant específica que més interès recull en aquest cas és la metrologia dimensional, la que s'ocupa de les mesures de les dimensions.

Paral·lelament a la metrologia, s'hi troba la *metrotècnia* com la tecnologia o el conjunt de tècniques que estudien les mesures, ocupant-se de la realització d'aquestes, de l'ús d'instruments de mesura i de tot allò que té a veure amb els treballs de medició. Així doncs, es pot definir la metrotècnia com la metrologia aplicada a la tècnica.

Amb tot això, ambdues disciplines tracten i es centren en el concepte de *magnitud*, de qualsevol propietat d'un cos, substància o fenomen físic susceptible de ser distingit qualitativament i de mesurar-se quantitativament, de ser mesurats i comparats, doncs; el temps, la longitud o la massa en són exemples clars. L'acció de *mesurar* equival a comparar una magnitud amb una altra de la mateixa naturalesa que es prendrà com a unitat fonamental. Així doncs, és indicar la quantitat de vegades que una unitat definida com a fonamental està continguda en una dimensió (nova mesura) determinada.

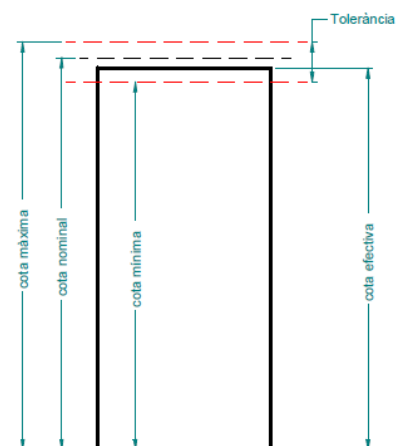


Fig. 1 Cotes en la metrologia

Per altra banda, el que sempre es mesura d'una peça o element és una *dimensió*; una dimensió o mida sempre vindrà fixada per la *cota nominal*, la mida definida teòricament pel disseny d'una peça

per mitjà de plànols o altres tipus de documentació, i per la *cota efectiva*, la mida real que fa la peça. La diferència nominal permissible entre la cota nominal teòrica i la cota efectiva real esdevindrà la *tolerància de fabricació*, és a dir, la mesura de l'exactitud en que els processos de fabricació empleats poden traspasar la mida teoria a la realitat. Amb això, cal tenir en compte que no és possible fabricar una peça a una cota exacta, ni tampoc és possible mesurar exactament una peça; el nombres enters i decimals exactes són més propis dels llibres que de la realitat. Ara bé, això no implica que a la pràctica es puguin assolir nivells molt acurats d'exactitud (toleràncies mínimes).

1.2.1.2. Instruments de mesura

Alhora, l'acte de la mesura es realitza per mitjà dels instruments de mesura. Generalment, es coneix com a *instrument de mesura* a l'element físic o conjunt d'elements que fan possible realitzar l'acció de mesurar i esdevenen l'intermediari interpretatiu entre la dimensió real a mesurar i el resultat final, el valor mesurat. Els instruments de mesura es componen per la denominada *cadena de mesura* usualment formada per la seqüència de captador, amplificador, indicador i registrador. El primer ens capta la senyal d'entrada i la transforma en una senyal susceptible de ser tractada; l'amplificador augmenta el rang de la senyal; l'indicador presenta la senyal augmentada en forma perceptible per l'operador; finalment, el registrador, permet conservar el resultat de la mesura.

Els instruments o mètodes de mesura es poden classificar segons diversos criteris [2]; segons les magnituds que es comparen es diferencia entre:

- a. **Mètodes directes:** quan es mesura directament o es compara una magnitud amb una altre de la mateixa classe elegida com a unitat. Es poden efectuar per lectura directa o per comparació entre la peça i una peça patró. És el cas de les mesures efectuades amb un peu de rei.
- b. **Mètodes indirectes:** es donen quan es calcula el valor d'una magnitud segons lleis físiques que relacionen aquesta magnitud amb altres més fàcilment mesurables. Mesurar un volum submergint un cos en un flux i observar-ne el desplaçament, per exemple.

Segons la metodologia de la mesura es té,

- a. **Mètodes de desviació:** quan el valor de la magnitud a mesurar queda determinat per la lectura d'un dispositiu indicador. És el cas dels micròmetres amb els seus nònius, per exemple.
- b. **Mètodes de zero o oposició:** es dona quan els efectes de la magnitud i el patró s'equilibren i l'indicador expressa un zero. Les balances o els multímetres són d'aquest tipus d'instruments.
- c. **Mètodes de substitució o comparació:** la magnitud a mesurar és substituïda per un altre que provoca els mateixos efectes en l'indicador. El rellotge comparador n'és l'instrument més clar.

Finalment, segons el sistema d'amplificació,

- a. **Mètodes mecànics:** són els que utilitzen mitjans mecànics per amplificar la senyal de la mesura. És el cas d'un mesurador de gruixos.
- b. **Mètodes òptics:** utilitzen mètodes de projecció o reflexió per mitjà de lents o miralls tot manipulant la llum (imatge) relacionada amb la mesura. El projector de perfils en pot ser un exemple.

- c. **Mètodes pneumàtics:** són els que utilitzen la diferència de pressió (caiguda) de l'aire en escapar entre el palpador i la peça. Les balances de precisió pneumàtiques formen part d'aquesta tipologia.
- d. **Mètodes electrònics:** aquests utilitzen procediment analògics o digitals de caràcter electrònic i/o electromagnètic per amplificar la mesura recollida inicialment. És el cas de les màquines de mesura tridimensionals.

Segons el tipus de mesura,

- a. **Instrument de mesura:** realitzen la medició per comparació amb la unitat de mesura.
- b. **Instruments comparadors:** realitzen comparacions amb una peça que es pren com a patró.
- c. **Instruments verificadors:** comproven si les dimensions d'una peça estan dintre de les toleràncies de fabricació arbitràriament elegides. No donen informació de la magnitud quantitativa, doncs.

Com ja s'ha explicat, per mitjà dels instruments de mesura el que es mesura són magnituds físiques, propietats susceptibles a ser distingides qualitativament, classificades, o determinades quantitativament, mesurades. Alhora, es coneix com a *sistema de magnituds* al conjunt de magnituds entre les quals existeixen relacions definides. En qualsevol cas, les magnituds es divideixen en:

- a. **Magnituds bàsiques:** acceptades, per conveni, com independents unes de les altres.
- b. **Magnituds derivades:** són funció de les magnituds bàsiques

1.2.1.3. Unitats i magnituds

El concepte d'*unitat* també resulta fonamental; una unitat és una magnitud particular, definida i adoptada per conveni, amb la que es comparen altres magnituds de la mateixa naturalesa. El metre (m) o el quilogram (kg) en són clars exemples.

Així doncs, d'entre tots els conceptes mencionats en aquest apartat, es centrarà l'atenció en els instruments de metrologia dimensional, grup en el que s'inclouen a les màquines de mesura tridimensional. Aquestes doncs, són instruments de mesura per mètode indirecte, amb tecnologia de medició per desviació i amplificació electrònica per procediment digital i exploració per contacte (palpador) o fotoelèctrica (sensors de proximitat). Així doncs, a partir del contacte amb un palpador o la captació de posició a través d'una sonda, les MMC són capaces de determinar la posició relativa (coordenades) del punt o element mesurat a partir dels paràmetres geomètrics característics de la disposició, orientació i posició dels elements mecànics que formen la màquina de mesura. Alhora, la captació i l'amplificació de la senyal mesurada serà transformada per a fer-la perceptible a escala humana per mitjà d'elements i circuits electrònics degudament programats. Tanmateix, també poden considerar-se instruments comparadors o verificadors donat que algunes disposicions o tipologies permeten la mesura de desviacions en característiques superficials, tal i com es veurà en els propers paràgrafs.

Per altra banda, pel que fa a les magnituds, donat que les MMC són elements de metrologia dimensional, cal enfocar la visió en la longitud com a magnitud bàsica, amb el metre (m) com a unitat fonamental que forma part de les set magnituds i unitats bàsiques del *Sistema Internacional d'Unitats* (SI); aquest fou adoptat per la comunitat científica i tècnica a partir dels anys seixanta a recomanació de la *11^a Conferència General de Peses i Mesures (CGPM)*, convenció on sorgeix. El SI incorpora a més del metre, el quilogram (kg) com a unitat bàsica de massa; el segon (s) per al temps;

l'Amper (A) per a la intensitat del corrent elèctric; el Kelvin (K) per a la temperatura termodinàmica; el mol (mol) com a unitat bàsica de quantitat de substància; i la candela (cd) per a la intensitat lluminosa.

Amb això, i des del 1983, el metre (m) es defineix com la distància que viatja la llum en el buit en un interval de temps de $1/299792458$ segons; és a dir, es defineix mitjançant la fixació del valor numèric de la velocitat de la llum en el buit ($c=299792458$ m/s).

Amb tot això, a nivell de practicat tècnica industrial i donada la magnitud dimensional en l'àmbit d'acció humana, la magnitud dimensional per excel·lència esdevé el mil·límetre (mm) i els seus submúltiples. Cal recordar que el mil·límetre esdevé una mil·lèsima part del metre. Una segona magnitud que serà molt recurrent en el transcurs del present projecte serà la magnitud angular de l'angle pla, no inclosa en el SI com a magnitud bàsica però acceptada com a derivada. En el *Sistema Sexagesimal* es mesura per mitjà del grau sexagesimal, minuts i segons d'arc ($^{\circ}, ', ''$, respectivament). Els graus sexagesimals divideixen l'angle recte en 90 parts o graus ($^{\circ}$), cada grau en 60 minuts ($'$) i cada minut en 60 segons ($''$). El SI, en canvi, promou la unitat angular utilitzant radians (rad), essent un radian l'angle que limita un arc de circumferència tal que la seva llargada és igual a la del seu radi. Tanmateix, per geometria bàsica existeix una clara equivalència entre ambdues unitats angulars ($1^{\circ}=\pi/180$ rad).

1.3.1. Introducció a les màquines de mesura per coordenades (MMC)

Entrant més en matèria específica, una màquina mesuradora per coordenades (MMC) és un sistema de mesura que posseeix els mitjans necessaris per moure un subsistema d'adquisició de punts i la capacitat per determinar les coordenades espacials del punt de la superfície de la peça que està sent mesurada. És, doncs, un instrument de mesura absoluta de precisió capaç de determinar la dimensió, forma, posició i actitud (perpendicularitat, plenitud, etc.) d'un objecte mesurant la posició de diferents punts de la seva superfície.

Es tracta d'una de les més potents i versàtils màquines metroològiques, i el seu ús està àmpliament estès arreu de plantes productives i fabricacions.

Les MMC es presenten en diferents arquitectures i disposicions i mostren un rang de mides que va des d'aquelles capaces de mesurar grans peces, de l'ordre de desenes de metres, fins a les que s'apliquen en l'àmbit de la nanometrologia; les més comunes es troben en un rang de mesura que varia dels 0,5 als 2 metres; poques són les peces les dimensions de les quals una MMC no pot adquirir.

Una MMC proporciona una realització física d'un sistema tridimensional rectilini i cartesià de coordenades. Tal i com es veurà en els següents apartats, hi ha altres tipus de màquines de mesura que també produeixen mesuraments amb sistemes de coordenades cartesianes però no purament rectilinis en el sentit de disposar d'eixos de moviment perpendiculars en les direccions del sistema de referència envers el que mesuren. De fet, la tipologia de màquina de mesura en la que es centra aquest projecte, la de braç articulat, no es troba inclosa per la bibliografia consultada en el grup de les MMC purament cartesianes. Tanmateix, la definició i exposició del funcionament d'aquestes contribueix significativament per simplificar la comprensió i el disseny d'un braç de mesura tridimensional per coordenades.

Utilitzant les coordenades cartesianes, la posició d'un punt en l'espai tridimensional real es pot definir pels valors relatius dels tres eixos d'un suposat sistema de referència únic x, y i z . Fent ús de sèries de i punts (x_i, y_i, z_i) , per $i \in \forall E$, és possible construir un element geomètric pla (punt, recta o pla) que passi per ells o que s'hi approximi al màxim. Llavors, una màquina de mesura tridimensional

per coordenades cartesianes és aquella capaç de definir inequívocament i amb extremada precisió la posició d'aquests punts en l'espai tridimensional, i de calcular els paràmetres significatius de les figures geomètriques sobre les que han estat presos aquests; es poden determinar tant mesuraments dimensionals (distància entre elements, longituds, angles, etc.) com a desviacions de la regularitat geomètrica (errors de rodonesa, de planitud, de rectitud o de paral·lelisme, entre d'altres) entre superfícies annexes.

La recollida de dades es pot dur a terme a través de diferents sensors o *sistemes d'adquisició de punts (SAP)*, tant de contacte (*palpador*) com sense contacte (*sonda*) i de forma continuada o discreta. Cada punt mesurat s'expressa en termes de les seves coordenades cartesianes. Alguns sistemes són capaços de recollir també els vectors de direcció dels punts, el que normalment permet una millor precisió. Tanmateix, no és possible avaluar els paràmetres dimensionals significatius i complets de la peça de treball (per exemple, diàmetre, distància, angle, forma, etc.) ni les relacions entre ells directament a partir de les coordenades dels punts mesurats; es necessita un model analític o computacional de la peça o superfície per avaluar els paràmetres. Aquest model normalment consta d'elements geomètrics ideals, els anomenats *elements geomètrics substitutius* (matemàtics) i s'implementa a partir d'un processador de gran capacitat operativa, com pugui ser un ordinador. Aquests elements es poden determinar aplicant un software operatiu geomètric adequat que s'ajusti al conjunt de dades mesurades [3].

Les primeres MMC apareixen a finals de la dècada dels anys 50 del segle XX i, actualment, s'han convertit en un dels instruments de la metrologia la presència dels quals és fonamental als departaments de qualitat i control de la major part de les grans empreses de producció industrial en sèrie. Aquests equips són capaços d'oferir un control efectiu i àgil del procés de fabricació de qualsevol producte, caracteritzant-se per una avaluació ràpida i precisa dels aspectes dimensionals d'aquest.

Generalment, la utilitat d'aquests instruments de mesura recau en dues grans aplicacions:

1. Control de la correspondència entre un objecte físic amb les seves especificacions teòriques (expressades en un plànol o en un model matemàtic) en termes de dimensió, forma, posició i actitud.
2. Definició de característiques geomètriques dimensionals (dimensions, forma, posició i actitud) d'un objecte ja fabricat les característiques teòriques del qual són desconegudes. Com ja s'ha vist, aquesta seria l'aplicació que motiva tot el desenvolupament de la present memòria.

Les MMC es conformen per la unió de diversos sistemes i elements l'acció combinada dels quals en possibilita la funcionalitat. D'entre les quatre grans tecnologies emprades s'hi troben els següents:

- Estructura mecànica: permet el posicionament i el moviment dels elements funcionals junt amb tot un entramat d'elements mòbils i accionadors (motors); aquests instruments de mesura esdevenen una unitat d'operació per control numèric (CN), o manual, que ha de ser capaç de

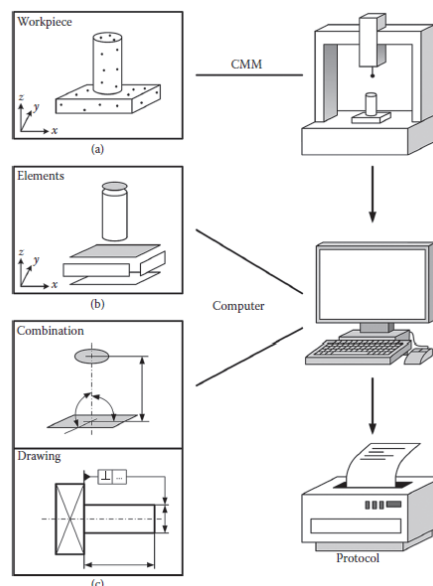


Fig. 2 Naturalesa de la mesura per coordenades

posicionar un element sensor en qualsevol punt del seu *volum útil de treball* (VUT). Acostuma a formar-se per un conjunt de mecanismes que possibilita tres graus de llibertat de moviment, un per cadascun dels eixos cartesianes.

- **Sistema d'adquisició de punts (SAP):** és la part operacional encarregada de recollir les dades posicionals envers cada punt avaluat. Es tracta d'un dispositiu que registra les coordenades dels punts que reposen sobre la superfície de la peça a mesurar en qüestió, amb o sense contacte físic amb la mateixa.
- **Unitat de control:** el control cinemàtic i la computació de la pròpia màquina, doncs, també són necessaris essent aquests aparells conjunts mecànics multiaxials la mobilitat dels quals recau en una arquitectura concreta i distribuïda d'acord al control dinàmic de la màquina. Alhora, i a banda d'un programari intern de funcionament d'obligada presència, també poden incorporar programes o softwares específics, orientats a solucions d'aplicacions concretes i geometries complexes, tals com engranatges, pales de turbina, etc.
- **Equipament computacional extern:** la presència d'un ordinador complementari resulta imprescindible per obtenir un model tridimensional analític per mitjà de programes de disseny assistit per ordinador (CAD, per les seves sigles en anglès) des d'on avaluar realment les mesures desitjades.

Per norma general, es denominarà *màquina* al conjunt format per l'estructura mecànica i el SAP; tanmateix, la realitat és que és la combinació dels quatre sistemes citats anteriorment el que atorga funcionalitat a una MMC.

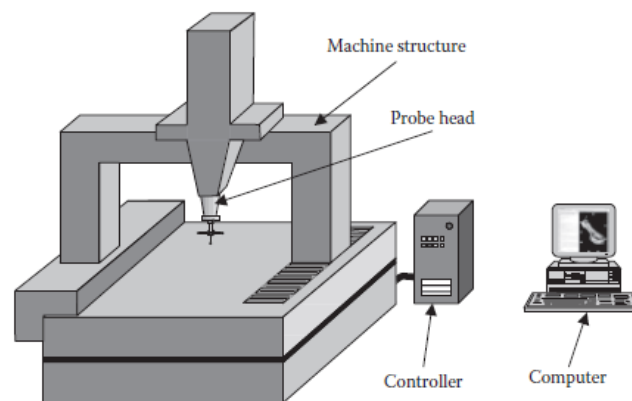


Fig. 3 Sistemes d'una màquina CMM

Els tres eixos mòbils d'una MMC formen un sistema de coordenades de referència cartesià el qual està connectat al capçal, amb el seu corresponent SAP. Els transductors i les corresponents escales determinen el desplaçament dels eixos al llarg d'una trajectòria de coordenades, doncs. Això permet que qualsevol punt del volum útil de mesura (VUT) es cobreixi utilitzant un punt de referència espacial al punter de sonda o palpador.

Un cop repassades les diverses parts funcionals d'una màquina de mesura tridimensional per coordenades cartesianes, es pot concloure que una mesura realitzada per mitjà d'una MMC inclou, a caràcter general, els passos següents:

1. Calibratge del SAP respecte al punt de referència del capçal; es fa normalment utilitzant una esfera calibrada.

2. Determinació de la posició i orientació de la peça de treball (sistema de coordenades de la peça (X_w, Y_w, Z_w)) en relació al sistema de coordenades de la màquina (X_m, Y_m, Z_m) .
3. Mesura dels punts superficials d'interès de la peça (posició).
4. Avaluació dels paràmetres geomètrics de la peça d'interès.
5. Comunicació i avaluació dels resultats de mesura o representació de l'ens per mitjà de la generació d'un model tridimensional computacional.

Pel que fa als materials constructius de les MMC, aquests són diversos en funció de les especificacions i les aplicacions que cada aparell satisfà. Cal tenir en compte que, històricament, les MMC han estat instal·lades en recintes de metrologia en el que l'ambient (temperatura, composició de l'aire, partícules, etc.) està meticulosament controlat. Tanmateix, l'impressionant desenvolupament de l'automatització de processos ha generat la necessitat de realitzar mesures i controls dimensionals situ, en la mateixa ubicació en la que es produeixen i fabriquen les peces.

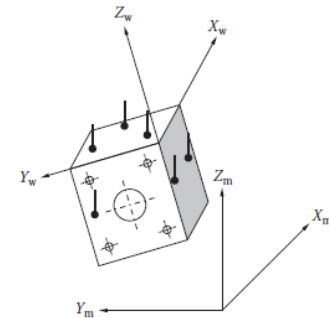


Fig. 4 Els sistemes de coordenades entre peça i màquina acostumen a ser diferents

Precisament en aquests àmbits, les condicions ambientals i en particular, els gradients tèrmics espacials i temporals, poden influir negativament en la fiabilitat dels resultats. Així doncs, tant el disseny com els materials constructius aniran sempre en la direcció de la millora funcional.

Amb això, hi ha diverses formes de presentació o tipologies d'aquest tipus d'instrument de mesura. Tot i que el present projecte es centra en la tipologia de braç articulat, resulta convenient ser conscient de l'existència d'altres disposicions funcionals. Totes elles es tractaran amb més o menys deteniment a l'apartat següent.

1.3.1.1. Tipologies estructurals de MMC

Els paràmetres que caracteritzen l'estructura mecànica d'una MMC són les dimensions i l'arquitectura o disposició. Les dimensions o longitud dels eixos, determinaran directament el volum útil de treball (VUT). Aquest es podria definir com la regió tridimensional de l'espai on una màquina de mesura pot efectuar mesures; aquesta regió pot variar des de 1 dm^3 fins a diverses desenes de m^3 . Resulta fàcil apreciar com les dimensions de l'estructura mecànica poden influenciar fortament les demés característiques d'una MMC (comportament enfront variacions de temperatura ambient, estabilitat estructura, precisió, etc.).

Pel que fa a l'arquitectura de les estructures mecàniques de les màquines de mesurar, aquesta està força consolidada [4]. En general, és possible afirmar que un tipus determinat de tipologia estructural tendirà sempre a trobar el millor compromís entre:

- a. Els conceptes de dinàmica del sistema (mobilitat)
- b. La precisió (funcionalitat)
- c. La facilitat d'accés a la peça a mesurar (accessibilitat)

L'arquitectura d'una màquina mesuradora per coordenades canvia depenent de diversos paràmetres entre els quals destaquen les direccions de desplaçament dels seus components, com es fan aquests desplaçaments i el volum de mesurament. La norma UNE-EN ISO 10360-1 fa una classificació dels diferents tipus (*fig. 5*). Cadascuna compta amb una sèrie d'avantatges i inconvenients que la faran més adequada per a unes aplicacions determinades en detriment d'altres per a les quals no serà tan eficaç.

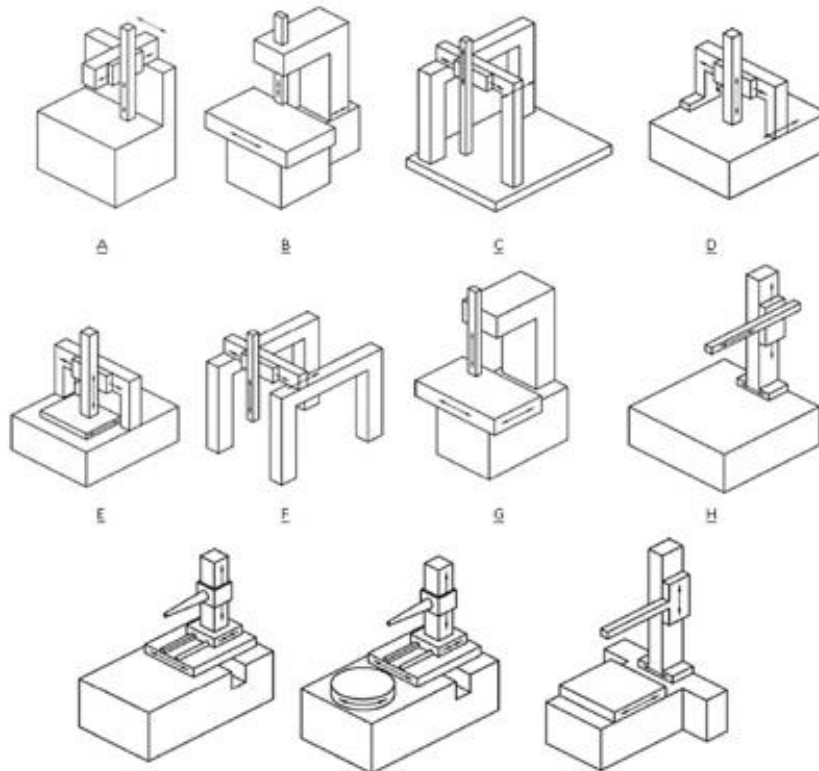


Fig. 5 Tipologies estructurals de màquines CMM

La primera és la màquina de *Cantilever*. Aquesta compta amb tres components mòbils al llarg de tres guies perpendiculars entre si. El sistema de palpat és solidari amb el primer component, el qual es mou verticalment respecte al segon i tots dos es desplacen respecte al tercer horitzontalment. Aquest, a més, es mou horitzontalment envers la base de la màquina a i està recolzat en un sol extrem.

Es tracta d'un tipus d'arquitectura que no es fa servir gaire en l'actualitat i, originalment, s'aplicava en màquines mesuradores per coordenades manuals. Com que la taula de suport no inclou les guies de moviment, es poden mesurar peces de massa considerable sense que això influeixi en la precisió de la mesura. Alhora, com que la part mòbil és força lleugera, és una màquina àgil en mode manual i treballa a altes velocitats per mitjà de control automàtic.

El volum de mesura és llarg en una direcció però limitat envers els altres dos eixos, per la qual cosa és una MMC particularment adequada per mesurar peces esveltes.

Com a inconvenient, cal destacar que en prendre mesures a l'extrem del braç de mesura en voladís, la flexió d'aquest pot provocar petites variacions en les valors mesurats; La majoria de mitjans mecànics únics per compensar aquest efecte s'han complementat amb tècniques de correcció d'errors implícites al software de funcionament. A mesura que el carro es mou cap a la seva posició

exterior extrema, la flexió es converteix en un factor a tenir en compte. Alhora, causa de l'efecte del voladís, l'estructura té una freqüència natural més baixa, que limita la mida de la màquina.

Un segon tipus de màquina seria la MMC de pont mòbil. Aquest aparell esdevé el cavall de batalla de l'indústria metrològica per coordenades essent una de les configuracions més àmpliament implementades. Compta amb tres components que es mouen al llarg de guies perpendiculars entre si i un sistema de palpat solidari amb el primer dels elements. Aquest primer, a més, es mou verticalment respecte del segon i junts es mouen horitzontalment respecte al tercer. Aquest últim element es recolza sobre dues columnes, les quals reposen a costats oposats de la base de la màquina, i es mou horitzontalment respecte a la base sobre la qual se situa la peça.

La disposició descrita compta amb l'avantatge davant de la resta de tipologies en voladís que l'efecte de flexió del segon eix horitzontal es redueix considerablement a causa de l'existència de dos punts de suport (columnes). Així doncs, les imprecisions degudes a l'existència d'un únic braç desapareixen. Contràriament, aquesta configuració pot provocar el fenomen conegut com *yawing* (o *walking*) que es dona quan els dos suports del pont es desplacen a velocitats diferents provocant una component de torsió al pont; inevitablement, aquesta situació fa perillar la precisió de les mesures efectuades.

Essent la tipologia més utilitzada, els seus volums de mesura varien des dels més petits, de 0,1 dm³, fins als més grans, entorn els 8 m³.

Un quart tipus de màquina és la de tipus pòrtic, també conegut com tipus *Gantry*. Aquesta es troba composta per tres components que es mouen al llarg de guies perpendiculars entre si, estant el sistema d'adquisició de punts fix al primer component que es troba posicionat i es mou verticalment respecte del segon. El conjunt del primer i del segon es desplacen horitzontalment respecte del tercer i aquest es trasllada horitzontalment sobre dos rails encaixats a la base de la màquina, un a cada costat d'aquesta.

És la màquina de major volum útil de treball (VUT) ja que pot assolir volums superiors als 10 m³, i s'utilitza per realitzar mesuraments precisos en peces molt grans, com ara motors, xassís, vehicles o components d'estructures aeroespacials. Per això, la base està dissenyada com una estructura massiva, de gran tonatge, per limitar les deflexions de l'estructura induïdes pel posicionament de peces de grans dimensions. Alhora, per evitar l'efecte *yawing* en la biga mòbil es poden introduir sistemes de doble accionament. Un programari de compensació adient també es pot utilitzar eficaçment per corregir les distorsions geomètriques causades per la càrrega i els efectes de la temperatura [Dotson et al, 2003].

El següent tipus de màquina seria la de columna. El moviment horitzontal es realitza mitjançant la taula en què se situa la peça i el sistema de palpat es desplaça verticalment sobre una columna fixa. Aquesta configuració pot donar lloc a una gran precisió però en tenir una estructura amb forma de "C", aquest paràmetre es pot veure afectat per variacions tèrmiques. Això provoca que siguin instruments utilitzats en ambients especialment condicionats, és a dir, sense grans gradients tèrmics, com ara laboratoris de metrologia i no tant en entorns productius.

El darrer tipus de MMC que es contempla en aquesta classificació seria la de braç horitzontal que, alhora, pot comptar amb diferents configuracions: amb capçal mòbil, amb taula fixa, amb taula fixa i plat giratori o amb taula mòbil, i altres de reduïda aplicació.

La primera, de capçal mòbil, està composta per tres components que es mouen al llarg de guies perpendiculars entre si. El sistema de palpat va fix al primer component i es mou horitzontalment respecte del segon. Ambdós es mouen verticalment respecte al tercer que es desplaça també horitzontalment pel que fa a la base de la màquina on es situa la peça. A la configuració de taula fixa, la diferència és que el primer component només es recolza en el segon amb un extrem en disposició

tipus *Cantilever*. La de taula fixa i plat giratori és similar però incorpora un plat giratori a la taula de la màquina i, sobre aquest, es col·loca la peça que es vol mesurar. Finalment, la de taula mòbil situa la peça directament sobre el tercer component.

Totes les variants tenen com a avantatge la seva excel·lent accessibilitat a totes les parts de la peça que es vol mesurar i la seva alta velocitat de treball. Alhora, el braç mòbil pot arribar a tenir un camp de mesura de fins a 25 m. Això les fa adequades per al seu ús en el sector de l'automoció, per exemple, a l'hora de mesurar carrosseries o motors. Per contra, la precisió es veu una mica afectada per la manca de rigidesa dels seus components i l'aparició d'errors d'*Abbe offset* relativament grans a causa del disseny en voladís; així doncs, els nivells relatius d'incertesa en la mesura varien considerablement el que obliga a compensar les variacions mitjançant el programari de control de la màquina.

1.3.1.2. Sistema d'adquisició de punts (SAP)

Les medicions de les màquines mesuradores per coordenades (MMC) es realitzen a través de l'adquisició posicional de punts sobre una superfície per mitjà d'un sistema dissenyat per a tal funció [4]; aquest és la part mòbil final de la cadena de mecanismes i es desplaça en les direccions dels eixos per tot el volum de mesura de la màquina. La normativa i altres documents tècnics també es refereixen a aquest component bàsic per mitjà de les denominacions *sonda*, *sistema de palpat*, *palpador* o *palpador universal*; en la present memòria s'utilitzarà el terme *sistema d'adquisició de punts* (SAP) degut al seu caràcter més generalista, i es donarà explicació, per mitjà d'una classificació adient, a l'existència dels diversos noms. Tanmateix, es tracta sempre d'un captador de posició que, per mitjà de contacte directe o a distància, permet prendre les coordenades de punts concrets de la peça perquè el programari associat a la màquina pugui relacionar-los i obtenir els mesuraments desitjats.

El punt com l'element geomètric fonamental, sense dimensió ni propietats físiques; és com un maó que compona la resta de construccions dimensionals que realitzarà el software de funcionament per identificar, localitzar o relacionar entre sí característiques geomètriques de la mostra sotmesa a anàlisi. Així doncs, la localització correcta de punts sobre superfícies esdevé un factor important en la reducció de l'error sistemàtic de les MMC. Així doncs, el SAP és la base del funcionament d'una MMC.

Al llarg de la seva breu història, les MMC han fet ús de diferents sistemes d'adquisició de punts. Actualment, es troben disponibles al mercat una gran varietat de sistemes i, encara que solen ser compatibles amb la major part de les màquines, cal determinar quin tipus és el que s'ajusta millor a les necessitats específiques de cada aplicació.

Amb això, segons la forma en que el sistema es relaciona amb la superfície on s'ha de posicionar un punt es tenen dos grans grups o tipologies:

- a. **SAP per contacte:** també coneguts com *palpadors*, *sistema de palpa* o *palpadors universals* requereixen d'incidència o intersecció física directa entre la superfície a tractar i el sistema per posicionar un punt.
- b. **SAP sense contacte:** recollits en el terme *sonda*, permeten el posicionament de punts sense necessitat de estar en contacte amb la superfície.

1.3.1.3. SAP per contacte

Els palpadors o sistemes d'adquisició de punts per contacte es poden agrupar, alhora, en dues grans variants i els conseqüents subgrups:

a. Passius: també denominats *fixes*, l'estat o posició (punts) en el que el palpador està en una relació d'incidència a la superfície a mesurar es valida, és a dir, se'n registren les coordenades cartesianes, sota la indicació de l'usuari per mitjà d'un accionador o sistema similar. S'acostumen a utilitzar exclusivament en MMC manuals amb les que l'usuari posa en contacte la sonda amb la peça, espera que la MMC s'estabilitzi i es registra la seva posició.

Hi ha una gran varietat de configuracions i s'utilitzen actualment per mesurar superfícies corbes, distàncies entre elements, angles i diàmetres d'eixos o de forats en aplicacions que no requereixin de gran precisió. L'inconvenient que pot tenir aquest sistema és que, en ser operades directament per un individu, la repetibilitat de les mesures no es pot assegurar.

- i. Punta viva:** és el tipus de SAP que incorporaven les primers màquines de mesura originàriament, que no eren altra cosa que lectors mecànics de coordenades amb un punter. L'únic aspecte positiu d'aquest tipus de palpador és la seva capacitat per localitzar punts reals sobre les superfícies treballades degut a que no compten amb cap tipus de radi o arrodoniment (a gran escala) en el seu extrem. Pel calibratge de la punta es requereix d'un bloc patró cúbic, amb orientació paral·lela als eixos de la màquina; l'orientació de la punta ha de permetre l'accés a tres de les cares adjacents del calibre cúbic. El seu ús exclusivament manual el fan un palpador poc productiu però molt adient per mesurar petits orificis o perfils roscats. Alhora, l'alteració de la punta degut al desgast o a un mal ús augmenta la possibilitat d'error en la mesura.
- ii. Punta esfèrica:** l'extrem del palpador que entra en contacte amb la superfície de la peça, és una esfera de robí sintètic. S'utilitza com a material de fabricació de la punta el robí per la seva elevada duresa, cosa que minimitza el desgast, així com per la seva baixa densitat, que fa que la massa de la punta sigui més petita i, per tant, que es redueixi la possibilitat d'una detecció errònia d'un punt a causa de les vibracions de la màquina. Abans de començar a realitzar les mesures amb la MMC, cal assegurar la ubicació i el diàmetre de l'esfera de la manera més precisa possible i, per això, s'utilitza una esfera calibrada d'uns 30 mm de diàmetre, generalment fabricada de material ceràmic, amb què la màquina pot determinar aquests paràmetres previs a qualsevol mesura.

A més de palpadors rectes de punta viva o esfèrica, hi ha altres tipus de palpadors aplicats en SAP passius l'ús dels quals és més específic. Un d'aquests pot ser el palpador en estrella, utilitzat per inspeccionar superfícies diverses quan és precisa mesurar i localitzar característiques amb diferents orientacions tals com ranures, radis interns canviants, etc. Per altra banda, si es desitja evitar interferències amb la mostra i realitzar exploracions des de posicions diferents i sota un baix cost, es poden disposar de SAP amb múltiples orientacions de punta.

b. Actius: per mitjà d'un sistema auxiliar o d'un sensor integrat es validen automàticament les coordenades de la posició (punts) en la que el palpador es troba en relació d'incidència a la superfície a mesurar. Es tracta doncs, d'un sistema automàtic en llaç tancat o realimentat, cíclic. Aquests sistemes poden llegir la posició en moviment, sense pèrdua de precisió ni necessitat de lectura estàtica. Alhora, acostumen a incorporar palpadors de punta esfèrica com els descrits anteriorment.

- i. **Discontínu:** també anomenades *sondes de palpat punt a punt* (o *d'accionament per contacte*) permeten obtenir diferents punts sobre la peça de forma discreta i són les més utilitzades actualment. Cada cop que la punta de la sonda entra en contacte amb la peça, es genera un senyal elèctric o canvi d'estat (digital) per mitjà d'un sistema o sensor binari integrat de manera que les coordenades de la posició del palpador, en aquell precís instant, queden registrades.

Aquests tipus de SAP poden ser manejats manualment o automàticament i compten amb una gran varietat de capçals i accessoris, el que en proporciona una gran versatilitat; resulten especialment eficaços en la mesura automàtica de peces la majoria de característiques geomètriques d'interès de les quals es trobin orientades longitudinalment en un eix. A més, eliminen la influència de l'operari en els mesuraments donat que l'accionament es realitza per la pròpia situació d'incidència entre palpador i superfície.

- i. **Continu:** també coneguts com *sondes de palpat continu* o *Scanning*, la característica particular d'aquesta tipologia de SAP és la possibilitat de realitzar l'exploració en moviment continu amb un palpador esfèric, tangent a la superfície mesurada. Encara que també poden ser utilitzades com els SAP anteriors, per prendre punts de manera discreta, la seva funció principal és el registre continu de les coordenades d'una sèrie de punts de la superfície de la peça cada cert interval de temps, determinant-ne la forma i la mida.

Un sistema auxiliar o controladora dedicada, amb l'ajuda d'un software específic, genera les dues components de força que mantenen el sensor en un pla d'exploració amb desviacions limitades al llindar preestablert respecte de la posició neutra o d'origen. En temps real es realitza la lectura de les coordenades en els reglatges de la màquina.

La participació dels SAP de contacte continu resulta molt eficaç i pragmàtica en els processos de reenginyeria (enginyeria inversa) de productes amb el propòsit d'assolir ràpidament un model tridimensional digital de superfícies complexes generades a partir d'un ens ja fabricat. Basant-se en els models obtinguts, es pot obtenir fàcilment els programes de control numèric (CN) per als processos de mecanitzat destinats a fabricar còpies del model mesurat en sèrie per mitjà de la relació CAD-CAM.

1.3.1.4. SAP sense contacte

El progrés en l'àmbit del desenvolupament dels sistemes de visió artificial o per ordinador i en l'ús de sistemes de làser industrial i escanejat tridimensional permeten explorar superfícies sense la necessitat de palpar, de contacte directe. En aquests casos, l'interès i el fonament de funcionament, normalment, recau en l'ull òptic del sistema o un feix làser.

Aquest tipus de sondes, normalment, s'acostumen a utilitzar en aplicacions on la peça és flexible o d'un material tou (per exemple, d'alguns polímers porós) en les que un contacte o situació d'incidència amb el SAP pot distorsionar la geometria de la pròpia peça. No obstant això, generalment compten amb una incertesa en la mesura superior que els SAP amb contacte i, per tant, una precisió inferior.

A grans trets, la classificació es distribueix en les dues següents tipologies:

- a. **Vídeo:** també conegudes com *sondes de visió* no fan un mesurament directe sinó que obtenen una mena de fotografia de la peça, que es digitalitza i a partir de la qual se

n'obtenen les dimensions. Solen ser ràpides i precises i es fan servir fonamentalment en aplicacions on es requereixi una inspecció immediata de la peça.

- b. Làser:** aquest tipus de sonda funciona igual que el SAP d'accionament per contacte (actius discontinus) però, en aquest cas, és un feix de llum d'elevada intensitat que funciona com a interruptor òptic i que interactua amb la superfície de la peça reflectint-se a sobre i essent recollit per un fotoreceptor o detector de fotodíodes. La sonda projecta un feix de làser sobre la superfície i, aleshores, la posició d'aquesta es determina per triangulació a la lent que es troba al receptor. Amb aquest tipus de sondes poden aparèixer certs problemes com, per exemple, en la mesura de superfícies esfèriques o de geometria complexa, si el feix làser es reflecteix en una altra adreça que no sigui la del detector, causant mesures errònies. Alhora, aquests sistema presenta un gran de dependència elevat envers la brillantor i l'acabat superficial de la superfície que es mesura.

A banda del que s'ha comentat, també hi pot haver configuracions MMC amb sistemes d'adquisició de punts sense contacte que combinin ambdues tecnologies principals.

1.3.1.5. Software de mesura

Quan el sistema d'adquisició de punts (SAP) duu a terme els contactes amb la superfície de la peça, la informació posicional recollida ha de ser analitzada a través d'un programari específic, de manera que pugui ser traduïda, a posteriori, en un conjunt d'elements geomètrics coneguts (plans, esferes, cercles, etc.) per mitjà de models d'ajust i aproximació que poden ser més o menys complexos. Un cop realitzades aquestes aproximacions a elements geomètrics, es podran calcular diversos tipus d'operacions i relacions entre ells com, per exemple, interseccions, posicions, distàncies entre elements o errors geomètrics de les peces (com ara de rodonesa, de cilíndricitat, de planitud, etc.).

Segons la norma UNE-EN ISO 10360-1:2001, es defineix un software de referència com el que calcula els valors de paràmetres de referència així com els residus de referència de l'element gaussià associat a cada conjunt de dades, essent aquests valors els valors numèrics dels paràmetres emprats en la parametrització per a un conjunt particular de dades de referència.

En conseqüència, un programari de mesura comprèn tot el conjunt de programes, procediments i documentació emprats per controlar el funcionament d'una màquina mesuradora per coordenades (MMC). La utilització d'un bon programa de mesura assegura una bona precisió en les mesures, anàlisis estadístiques d'alt nivell completades amb bases de dades i, en definitiva, permet un control en temps real del funcionament de la màquina. Per tant, el desenvolupament de programari de mesurament adequat en el cas de les MMC és un dels factors més importants a l'hora d'explicar la importància que han assolit aquestes dins del camp de la metrologia industrial i els processos de control dimensional.

Amb això, en qualsevol software de mesura cal diferenciar-hi dues grans parts:

- a. Control de mesura:** l'encarregada del control de la mesura (aproximació del palpador, esmorteïment de vibracions, deducció de coordenades, parametrització, etc. La part focalitzada en assolir la medició i localització d'elements per mitjà de coordenades cartesianes estarà sempre present en qualsevol model i/o tipologia d'MMC.
- b. Control cinemàtic:** la part del control cinemàtic o de mobilitat de la MMC, si és de tipus automàtic. La part focalitzada en assolir la medició i localització d'elements per mitjà de

coordenades cartesianes estarà sempre present en qualsevol model i/o tipologia d'MMC. Només en els aparells automàtics, mai en els d'accionament manual, es trobarà la part dirigida al control cinemàtic dels elements que possibiliten la mobilitat del SAP i, per consegüent, la mesura.

1.3.2. Màquines de mesura per coordenades no cartesianes

Un cop vistes les diverses tipologies de màquines de mesura per coordenades cartesianes possiblement es trobi a faltar el tipus envers el que es desenvolupa el present projecte, els braços articulats de mesura per coordenades (BAMC). La immensa majoria de les fonts bibliogràfiques consultades inclouen aquesta estructura de MMC com un grup a part de la resta a causa de que no utilitza un sol sistema de referència cartesià per a efectuar les mesures.

La major part de MMC utilitzades en producció i investigació basen el seu funcionament en el sistema de coordenades cartesianes, sistema de referència únic que es construeix per mitjà de tres eixos perpendiculars entre si. Les coordenades dels punts característics d'una peça es mesuren i posicionen en l'espai per mitjà d'aquests aquest sistema de coordenades de forma directa, per mitjà d'escales i medicions lineals, en cadascun dels tres eixos cartesianes. D'aquesta forma, les MMC desplacen un sistema d'adquisició de punts per mitjà del moviment envers tres graus de llibertat (un per cada eix del sistema únic) per a efectuar els mesuraments. Alhora, una persona qualsevol, sense comptar amb una formació o coneixements tècnics avançats, es troba habitualment familiaritzada amb el sistema de coordenades ortogonals cartesià; forma part, en certa mesura, de la quotidianitat com a conseqüència de que resulta un sistema fàcil d'utilitzar per expressar posicions en l'espai sense necessitat d'aplicar processos analítics o deductius complexos.

La precisió de desplaçament d'una MMC cartesiana, i consegüentment en la mesura, està assegurada principalment per escales dimensionals i guies direccionades combinades. Per totes aquestes raons les MMC cartesianes han gaudit històricament d'una àmplia acceptació en l'àmbit productiu industrial.

Contràriament a tot això, quan s'utilitzen sistemes de coordenades no cartesianes, com els possibilitats per les coordenades cilíndriques o esfèriques, amb eixos no perpendiculars entre si, la situació canvia; els errors en les mesures angulars provoquen un augment en la complexitat de la deducció posicional dels punts d'interès i incerteses molt més grans, sobretot quan el punt mesurat està lluny de l'eix de rotació del sistema de referència.

Tanmateix, amb el desenvolupament de la ciència i la tecnologia productiva, hi ha una demanda creixent per desenvolupar sistemes de mesura basats en sistemes de coordenades no cartesianes, principalment pels motius següents [4]:

- Cada cop més i més grans projectes d'enginyeria requereixen precisions majors en les mesures. Components funcionals grans com els que formen part del fusellatge d'un avió o del xassís d'un camió de gran tonatge miner, per exemple, no es poden mesurar amb les MMC tradicionals. La dificultat tècnica i els costos de construir una màquina de mesura per coordenades cartesianes de tals magnituds són incommensurables.
- Una MMC cartesiana només pot treballar desplaçant els seus elements de forma paral·lela als tres eixos del sistema cartesià únic de referència que utilitza. Per tant, ha de comptar amb guies precises i escales més llargues que la peces mesurades per possibilitar una incertesa de mesura baixa; a major dimensions de la peça, més gran ha de ser la màquina de mesura. Això provoca que les màquines de mesura tradicionals siguin costoses i massives. No resulten aparells

adaptables, versàtils ni portàtils; no es poden utilitzar en cap altre lloc que en la posició o zona d'instal·lació. Els mesuraments in situ o a peu d'obra (de cadena productiva, en aquest cas) esdevenen dificultosos.

- Les llargues guies fan que els components estructurals i mòbils de les MMC cartesianes siguin grans i pesat. Amb l'augment del ritme de producció, hi ha una demanda per desenvolupar sistemes de mesura de coordenades lleugers i flexibles en termes d'aplicabilitat. Els sistemes o màquines de mesura no cartesianes esdevenen l'alternativa que sovint pot satisfer millor aquestes necessitats.

Hi ha diversos enfocaments que busquen desenvolupar un sistema per realitzar mesures per mitjà de sistemes de coordenades no-cartesianes; alguns mètodes es basen en la triangulació i altres en les coordenades esfèriques, per exemple; una altra visió es centra en mesurar distàncies d'un punt característic des de diversos punts de referència. En qualsevol cas, totes aquestes metodologies es materialitzen per composicions de diversos elements funcionals distribuïts en comptes d'una màquina o unitat operativa com a tal. Alhora, moltes es troben en vies de desenvolupament i són aplicables exclusivament en l'àmbit de la investigació i la recerca. En termes generals, la majoria dels sistemes de mesura de coordenades no cartesianes tenen menor precisió que els cartesianes i els algorismes de processament (software operatiu) de dades són més complicats. Així mateix, requereixen de tècniques de calibratge i normatives reguladores específiques noves. Amb tot això, hi ha un sistema de màquina de mesura per coordenades no cartesianes particularment desenvolupat, implementat ja en el mercat i àmpliament utilitzat en multitud de processos de qualitat i control dimensional industrial; es tracta dels *braços articulats de mesura per coordenades* (BAMC), l'objecte principal d'estudi d'aquest projecte.

1.3.2.1. Braços articulats de mesura per coordenades (BAMC)

Els braços articulats de mesura tridimensional són aquells aparells de medició per coordenades basats en una conformació lineal, formant una cadena de mecanismes en llaç obert constituïda per un seguit d'elements rígids units entre si per articulacions o parells de revolució que connecten una base estable amb la sonda de mesura o SAP.

Les articulacions dobles permeten realitzar al braç els girs necessaris per assolir qualsevol posició en l'espai. Els BAMC disposen comercialment de fins a 7 articulacions (1.4. *Estudi de mercat*) que materialitzen girs al voltant d'eixos perpendiculars entre si.

Aquesta configuració aporta molta llibertat de moviment, elevats VUT en comparació a l'estructura que els defineix i un destacada adaptabilitat a una gran diversitat de peces, en dimensió i geometria. Alhora, el seu tamany reduït i una massa relativament lleugera en permeten el transport i una ràpida instal·lació en la pròpia localització productiva. En contrapartida, les precisions oscil·len en valors inferiors a la resta de MMC a causa de que l'estabilitat estructural és també, inferior; aquest fet es veu agreujat per les reduïdes dimensions que presenten i la lleugeresa dels seus components. Aquesta configuració mecànica implica que el control acostumi a ser, gairebé sempre, manual; això facilita el temps de preparació, la interacció i la correcció en la mesura, que pot ser in situ donat que la interacció entre operari i aparell és directa. Per altra banda, la naturalesa d'operació manual fa que no es presentin configuracions amb articulacions prismàtiques que complicarien la seva manipulació.

En la gran majoria de braços de mesura és possible diferenciar quatre grans zones estructurals la denominació de les quals es fa per analogia amb el braç anatòmic humà; així doncs, en una

configuració de braç articulat de mesura per coordenades genèrica es poden identificar l'espatlla, el colze, el canell o braó i la mà, ordenats de forma successiva i tal i com s'indica en la figura adjunta.

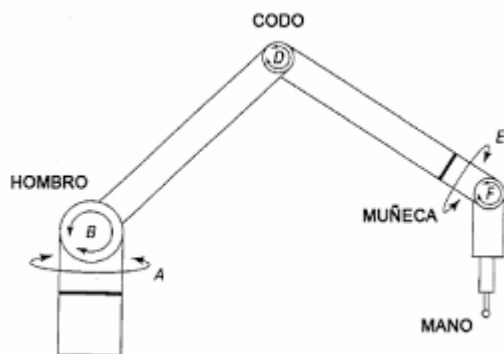


Fig. 6 Estructura típica d'un BAMC

Així com en les MMC cartesianes convencionals s'utilitzaven les escales relatives als eixos del sistema de referència per a realitzar les mesures, en els BAMC els desplaçaments deixen de ser exclusivament de translació entre els elements que els formen. Per tant, apareixen desplaçaments de rotació o angulars la caracterització dels quals esdevindrà fonamental per a posicionar els punts de mesura, tal i com es veurà en futurs apartats. Per a dimensionar aquests desplaçaments angulars, la gran majoria de braços articulats de mesura fan ús d'un element electrònic anomenat encóder òptic, components utilitzar per a una infinitat d'aplicacions que impliquen rotacions.

1.3.3. Encóder òptic

L'encóder òptic esdevé el principi de funcionament dels BAMC més comercialitzats (1.4. *Estudi de Mercat*) i, homòlogament, la base del dispositiu que es dissenyarà en el present projecte. Donada la seva importància, resulta interessant comprendre què és i com funciona aquest dispositiu electrònic capaç de mesurar rotacions.

Un encóder o encóder rotatiu és un aparell electrònic genèric molt senzill en concepte de funcionament que permet determinar la posició, i conseqüentment la velocitat angular, d'un accionament o articulació entre dos elements, i registrar el mesurament des d'un processador de dades o autòmat. Són doncs, uns dispositius de detecció que proporcionen informació sobre la posició angular, la velocitat i la direcció del moviment d'un objecte o sistema.

Hi ha diversos tipus d'encóders (magnètics, òptics, etc.), tanmateix, el que s'utilitzarà en el present projecte, en base a les informacions recollides, és l'encóder òptic. Els encóders òptics són molt precisos i fiables, ja que proporcionen una retroalimentació immediata sobre el moviment d'un sistema. Això els fa adequats per a molts processos de control i automatització

El seu funcionament es fonamenta en un disc amb una sèrie d'incisions radials en el seu si. A un dels costats del disc hi ha un fotosensor, un component electrònic que permet transmetre dos nivells o senyals de voltatge (alt i baix) en funció de sí detecta llum o no, respectivament. A l'altra costat del disc s'hi situa un díode led, un altre dispositiu electrònic encarregat d'emetre un feix de llum infraroja. En entrar en rotació l'eix de l'encóder, connectat al disc, quan el feix de llum passa a través d'un de les ranures del mateix, és detectat pel fotosensor que es troba a l'altre costat. Aleshores, aquest emet una senyal digital en forma de canvi de potencial. El nivell de la senyal (voltatge) variarà per cadascuna de les interrupcions causades pel pas de les ranures del disc entre el díode i el fotosensor. Així doncs, per cada angle rotat li correspon una quantitat determinada d'impulsos (ranures). La senyal elèctrica digital de sortida tindrà sempre forma esglaonada, combinant segments d'alt i baix voltatge d'igual longitud entre flancs de pujada i baixada.

El nombre de ranures incloses en el disc estarà directament relacionat amb la precisió del dispositiu; a major nombre de divisions, major precisió en la mesura de moviments angulars es tindrà. Per tant, s'entendrà per *encóder d'alta precisió* aquell aparell amb un gran nombre de divisions en el disc i,

per tant, una alta resolució de mesura angular. Tal i com es veurà en l'apartat següent, aquesta és la tipologia d'encòders que incorporen els braços articulats de mesura presents en el mercat.

Ahora, els encòder poden ser incrementals o absoluts en funció de la seva capacitat per produir senyals incrementals o absolutes, respectivament. Les senyals incrementals no indiquen la posició específica, només que la posició ha canviat i en quina mesura ho ha fet respecte de l'anterior. Els encòders absoluts, pel contrari, utilitzen una senyal diferent per a cada posició proporcionant tant la indicació que la posició ha canviat com la informació de la posició absoluta de l'encòder en relació a un origen comú.

Per altra banda, és possible que un encòder compti amb dues o més circumferències concèntriques amb igual nombre de ranures però intercalades entre elles. Aquesta també és una forma d'augmentar la resolució d'un encòder òptic. En aquest cas, hi haurà tantes senyals o canals de sortida com circumferències de ranures tingui l'aparell. Si l'encòder disposa de dues circumferències de ranures radials al seu disc, tindrà també dues sortides (canals A i B) formant un sistema equivalent al format per dos pulsadors l'accionament dels quals es va alternant coordinadament. Aquests hipotètics pulsadors estan desplaçats un respecte a l'altre, formant el que s'anomena un *encòder en quadratura*. En un encòder en quadratura hi ha un desfasament tal que ambdós canals de sortida produïts estan desplaçats 90° elèctrics entre ells. Evidentment, cadascuna de les senyals de sortida implicarà un pin de connexió diferent.

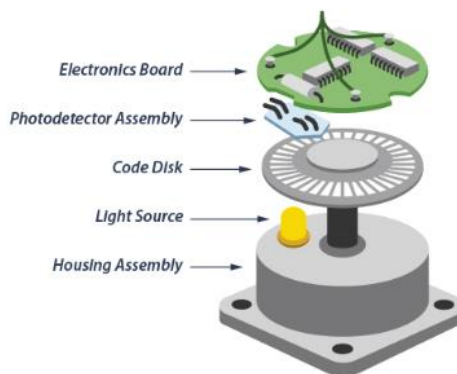


Fig. 7 Muntatge d'un encòder òptic típic

L'avantatge dels encòders en quadratura és que, a més de detectar la posició i la velocitat angular, permeten determinar el sentit de gir interpretant les seqüències de flancs. Per visualitzar-ho, cal considerar com a origen d'esdeveniments els flancs de pujada o baixada del canal A, per exemple. Si es gira l'encòder en el sentit CW, es produiran els esdeveniments $t_0, t_1, t_2, t_3 \dots t_n$.

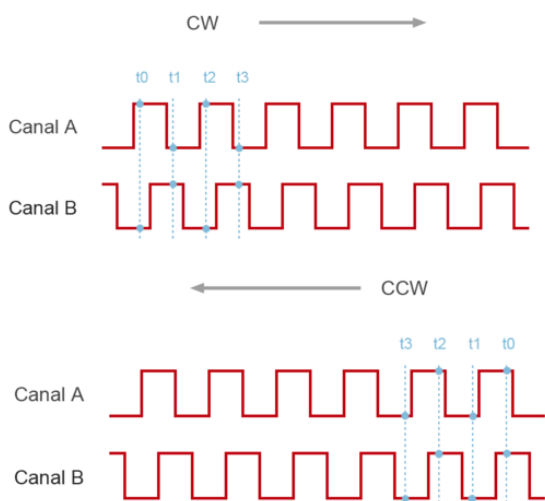


Fig. 8 Senyals de sortida d'un encòder òptic de 2 canals

Si per aquests mateixos esdeveniments s'observa el canal B, s'observarà que el sempre estaran invertits respecte del canal A; és a dir, si en A es troba en estat alt, en B es trobarà en estat baix. Si s'inverteix ara el sentit de gir (CCW), i igualment es pren com a referència els flancs de baixada o pujada del canal A, es veurà que als instants ($t_0, t_1, t_2, t_3 \dots t_n$) el senyal d'A i B són sempre coincidents.

En realitat, que el sentit de gir sigui horari o antihorari dependrà de la construcció interna del sensor, de la connexió, i del canal que es prengui com a referència. En qualsevol cas però, es veu clarament que és possible diferenciar el sentit de gir simplement comparant ambdós senyals obtinguts a

l'encòder. Assignant un significat físic (CW o CCW) a la rotació, es pot comprovar immediatament provant el muntatge.

En el cas que hi hagi dues circumferències de ranures (encòder en quadratura), per exemple, això implica que en superposar ambdues senyals de voltatge la senyal resultant es pot dividir en quatre parts diferenciades a causa del desfasament. Així doncs, si aquest encòder tenia una resolució nominal de n ranures/revolució, en realitat la resolució final podrà arribar a ser de $4n$ ranures/revolució. És a dir, el nombre de ranures per unitat angular augmentarà en un factor de 4. Aquesta explicació es veu molt clarament a partir de la *fig. 8* adjunta. Així doncs, en un encòder en quadratura hi ha més d'una opció possible en termes de precisió en funció de què es mesuri.

- a. **Precisió simple (n ranures/rev.):** registrant un únic flanc en un únic canal.
- b. **Precisió doble ($2n$ ranures/rev.):** registrant tots dos flancs en un únic canal.
- c. **Precisió quàdruple ($4n$ ranures/rev.):** registrant ambdós flancs en ambdós canals.

1.3.2. Mecanisme cicloidal

Un cop s'iniciï el procés de disseny estructural i funcional del BAMC projectat, es veurà la importància que adquireix aquest tipus de sistema mecànic de transmissió de moviment coaxial en la construcció de les articulacions. Així doncs, resulta de gran conveniència definir i explicar la conformació i els paràmetres que caracteritzen aquest tipus de mecanisme.

Amb això, un accionament cicloidal és un tipus de mecanisme recte per engranatges, normalment utilitzat com a reductor, capaç de proporcionar una relació de transmissió molt alta per mitjà d'un disseny compacte, amb unes dimensions mínimes en comparació a altres tipus de mecanismes, doncs. En contraposició als accionaments d'engrenatges convencionals, com el planetari, es poden assolir ràtios de reducció fins a 10 cops superiors per a un volum constructiu equivalent [5].

Alhora, compten amb un joc, impediment al moviment o bloqueig gairebé nul (*backlash*), una gran capacitat de càrrega, molta rigidesa i estabilitat, i una alta eficiència de transmissió. Aquestes propietats fan que els accionaments cicloidals siguin adequats per a moltes aplicacions on la precisió i el rendiment envers el posicionament són importants, com ara la robòtica, les màquines de mecanitzat per control numèric, etc.

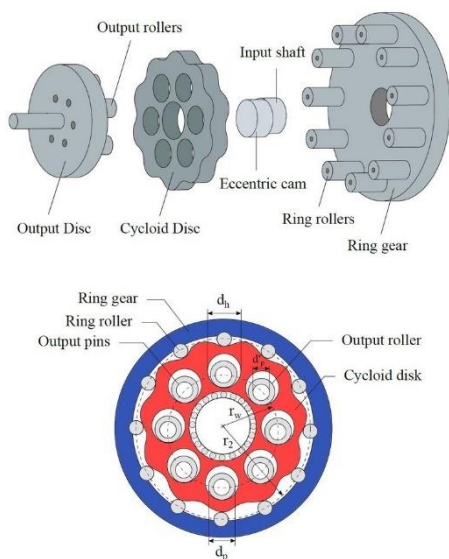


Fig. 9 Parts d'un mecanisme cicloidal genèric

Bàsicament, els mecanismes cicloidals es componen de cinc parts principals; la primera és un eix d'entrada del moviment d'alta velocitat (*high speed input shaft*) que impulsa un rodament amb una certa excentricitat (*eccentric bearing*). Aquest farà rotar un o més discs cicloides lobulars (*cycloidal disks*), també anomenats rotors, que alhora es mouen al voltant d'una corona dentada exterior (*ring gear*) que compta amb una sèrie de pins; el moviment excèntric fa que les dents o lòbuls dels discos cicloidals s'impulsin amb els corrons o pins de la carcassa de la corona dentada de manera que produeixen una rotació inversa a una velocitat reduïda. Alhora, els discs cicloidals s'integren a través d'orificis interiors en el seu sí amb una sèrie de passadors o rodets que són solidaris i impulsen directament un eix de sortida (*slow speed output shaft*). Donat que la corona sempre compta amb més pins que el nombre de dents del disc cicloidal, es provoca que la rotació excèntrica oscil·latòria del disc al voltant de l'eix central sigui més ràpida que la rotació de l'eix

d'entrada. Alhora, l'excentricitat de rotació del disc respecte dels passadors provoca l'avanç dels mateixos en sentit rotatori contrari, causant també la rotació en aquest mateix sentit de l'eix de sortida. D'aquesta manera, el moviment giratori de sortida serà sempre més lent i en sentit contrari que el d'entrada. A causa de la forma del disc i la seva posició en relació amb pins de la corona, s'observa que a mesura que avança el coixinet o eix excèntric, els lòbuls del disc no poden saltar al següent pin de rodatge davant la rotació imposada, però en canvi, sí que rellisquen o roden cap enrere. Aquest comportament és el que en realitat provoca la rotació inversa a l'eix de sortida. Per tal de compensar les forces de desequilibri causades pel moviment excèntric i proporcionar un funcionament més suau a altes velocitats, s'acostuma a instal·lar més d'un sol disc cicloidal; en qualsevol cas, cadascun d'aquests haurà d'anar desfasat 180° respecte de la resta.

1.3.3. Geometria i paràmetres característics d'un mecanisme cicloidal

La forma del flanc del disc cicloidal o rotor s'anomena *cicloide*. Una cicloide és una figura geomètrica complexa construïda a partir de la rotació d'una circumferència (rotatòria) al voltant del perímetre d'una circumferència base (base) de major radi un cert nombre de vegades. La cicloide o perfil cicloidal del disc sorgeix de la trajectòria corba alternant descrita per un punt perimetral concret de la circumferència rotatòria. Alhora, resulta interessant destacar la distinció entre una *epicicloide* i una *hipocicloide*; s'obté una epicicloide quan el cercle rodant es mou per l'exterior del base. Si, en canvi, la circumferència rodant es fa lliscar a l'interior de la base, apareix una hipocicloide. En conseqüència, els cercles rodants es poden dividir en interiors (hipocicloides) i exteriors (epicicloides).

Un engranatge cicloidal es basa en un cert nombre de pins (n_p) disposats de forma equidistants en una corona descrivint una circumferència de radi determinat (R_p) a dintre de la qual hi rota el disc cicloidal o rotor. En aquest cas, la forma del disc serà de tipus epicicloidal, és a dir, que es generarà a partir d'una circumferència de radi petit (R_r) rotant al voltant d'una circumferència base (R_b) un cert nombre de cops (n_d), generant-se una dent o lòbul al disc per a cadascuna de les rotacions efectuades. Com ja s'ha comentat, la trajectòria descrita per un punt qualsevol de la circumferència rotant petita descriurà el perfil de cada dent del disc. Així mateix, el rotor o disc cicloidal comptarà amb un nombre de dents o lòbuls (n_d) igual al nombre de pins de la corona (n_p) menys la unitat. Alhora, disposarà d'un

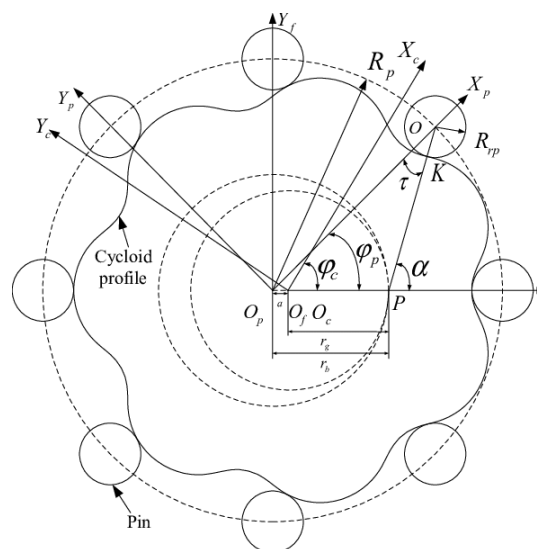


Fig. 10 Geometria bàsica d'un mecanisme cicloidal

cert nombre arbitrari d'orificis interiors disposats seguint una disposició concèntrica i simètrica i de radi conegut (r_f). A través d'aquests orificis s'hi situaran els passadors, al voltant dels quals, i de forma tangencial, rotarà el rotor. A major nombre de passadors, i de forats en el disc cicloidal doncs, major podrà ser el parell transmès a través del mecanisme. Els passadors aniran directament connectats a l'eix de sortida del moviment. Per altra banda, cal garantir una transferència de moviment bidireccional, és a dir, la utilització del mecanisme cicloidal indistintament com a reductor i com a multiplicador. Aquesta característica, designada sota el terme anglosaxó *backdrivable*, és indispensable en la construcció del braç articulat de mesura projectat. Per a possibilitar-la, caldrà

assegurar la mínima fricció possible entre els passadors i els disc cicloïdals del mecanisme i la inexistència de punts morts de moviment.

1.4. Estudi de mercat

Un cop conegut amb detall el camp tecnològic dels BAMC, el seu funcionament i conformació estructural, cal analitzar amb deteniment les opcions i alternatives disponibles en el mercat. Els dispositius funcionals ja implementats en la indústria resulten un bon punt de partida per començar el procés de disseny pròpiament, la fase d'enginyeria de concepte. Observant les característiques operatives i de muntatge que incorporen es poden agafar idees i conceptes aplicables al disseny propi. Es tracta doncs, d'un repàs per l'estat de l'Art envers aquest tipus d'instrument de mesura.

1.4.1. *Metrologia Sariki S.A.*

Per a obtenir de primera mà, s'ha contactat amb les empreses fabricants i distribuïdores de braços articulats de mesura més destacades del panorama nacional actual. Una d'aquestes empreses és *Kreon Technologies*, multinacional d'origen francès amb més de 25 anys d'experiència en el sector de la metrologia. La relació amb aquesta companyia s'ha establert a través de *Metrologia Sariki S.A.*, empresa dedicada a la distribució i implementació de solucions d'escaneig, mesura i calibratge tridimensional amb seu a Catalunya.

La gamma de BAMC per excel·lència de *Kreon*, i la més innovadora, és la línia de braços de mesura *ACE*, que inclou els models *ACE* i *ACE+*; com a resultat d'una tecnologia innovadora i una fabricació d'alta qualitat, aquests aparells representen una solució de mesura tridimensional d'alt rendiment, tant per escaneig com palpat. Ambdós són portàtils i excepcionalment fàcils d'usar. Disposen d'una bateria integrada amb una autonomia de fins a 5 hores, connexió per cable i sense amb *WI-FI* per la comunicació amb l'entorn i el control, i connexió d'alimentació i/o càrrega directa a endolls domèstics a tensió mundial universal (100-230V, 50-60 Hz).

Els dos models es troben disponibles en versions de 6 i 7 eixos; la primera opció esdevé ideal per a la utilització amb un sistema d'adquisició de punts per palpat, amb contacte, mentre que un major nombre d'articulacions resulta idoni per a un SAP d'escaneig làser. Cal tenir en compte que, a major nombre d'eixos (i d'articulacions, doncs) menor serà la precisió del braç. Així doncs, les precisions que enuncia el fabricant es troben entre 30 i 45 μm . La versió amb 7 eixos disposa d'una articulació i un mànec ergonòmic de control addicionals per controlar l'acció de l'escàner. Tanmateix, ambdós tipus de SAP són compatibles en un mateix model, indistintament, i es poden instal·lar i utilitzar de forma simultània. Amb això, l'intercanvi del sistema d'adquisició de punts és ràpid, senzill i manual, sense necessitat d'utilitzar eines o elements auxiliars.

Aquests BAMC compten amb volums útils de mesura d'entre 2 i 5 m per al model *ACE*, i d'entre 2,5 i 4,5 m per l'*ACE+*. Cal denotar que els VUT s'expressen en funció del radi del volum de mesura generat per l'extensió completa del BAMC. Per tant, les seves unitats seran les de longitud lineal pertinents (m) i no volumètriques.

Els preus, en funció del model i el nombre d'eixos amb el que compta, oscil·len entre 14.000 i 24.000 euros, aproximadament.

Envers les articulacions, aquestes són de gir infinit i incorporen encòders òptics d'alta precisió; es troben mecanitzades en alumini lleuger i incorporen contrapesos per a facilitar la maniobrabilitat. Alhora, els membres o elements del braç estan fabricats majoritàriament amb fibres sintètiques (fibra de carboni) i resines polimèriques, el que atorga una rigidesa molta gran seguida d'una massa mínima que en millora la maniobrabilitat.

Pel que fa al funcionament, no necessiten de preescalfament i incorporen sistemes de compensació de temperatura, a banda d'un bon aïllament tèrmic integral. Els braços ACE també disposen d'autodetecció de límits en eixos, una posició de repòs magnètic estable, per assegurar l'estabilitat en la mesura, i una posició de pàrquing per quan no s'està utilitzant directament.

Aquestes màquines de mesura, en conformitat amb les últimes normes ISO i compatibilitat amb els software més presents en el mercat, responen eficaçment a les creixents exigències de la indústria, en matèria de precisió i productivitat. Així doncs, totes incorporen un nivell de protecció IP51 (efectiu contra pols, no amb aigua) davant partícules i disposen, en un rang de temperatures de funcionament de 10°C a 45°C, amb una humitat relativa de fins al 95% i sense condensació, dels següents paràmetres de funcionament:

ACE	Model	VUT (m)	E _{UNI} (mm)	P _{SIZE} (mm)	P _{FORM} (mm)	L _{DIA} (mm)	SPAT (mm)
7 eixos	Ace-7-20	2,0	0,033	0,012	0,020	0,043	0,022
	Ace-7-25	2,5	0,036	0,015	0,024	0,049	0,027
	Ace-7-30	3,0	0,059	0,020	0,035	0,081	0,042
	Ace-7-35	3,5	0,069	0,024	0,041	0,095	0,054
	Ace-7-40	4,0	0,083	0,029	0,048	0,115	0,066
	Ace-7-45	4,5	0,112	0,045	0,060	0,125	0,078
	Ace-7-50	5,0	0,140	0,060	0,075	0,135	0,095
6 eixos	Ace-6-20	2,0	0,029	0,010	0,016	0,033	0,020
	Ace-6-25	2,5	0,032	0,012	0,019	0,038	0,025
	Ace-6-30	3,0	0,044	0,018	0,028	0,053	0,033
	Ace-6-35	3,5	0,056	0,021	0,037	0,068	0,042
	Ace-6-40	4,0	0,067	0,025	0,043	0,086	0,051
	Ace-6-45	4,5	0,080	0,029	0,048	0,100	0,069
	Ace-6-50	5,0	0,120	0,040	0,060	0,120	0,090

ACE+	Model	VUT (m)	E _{UNI} (mm)	P _{SIZE} (mm)	P _{FORM} (mm)	L _{DIA} (mm)	SPAT (mm)
7 eixos	Ace+7-25	2,5	0,029	0,012	0,022	0,045	0,025
	Ace+7-30	3,0	0,052	0,017	0,030	0,074	0,039
	Ace+7-35	3,5	0,063	0,021	0,037	0,089	0,045
	Ace+7-40	4,0	0,076	0,026	0,042	0,105	0,054
	Ace+7-45	4,5	0,103	0,040	0,051	0,114	0,067
6 eixos	Ace+6-25	2,5	0,026	0,009	0,017	0,037	0,021
	Ace+6-30	3,0	0,039	0,014	0,024	0,047	0,030
	Ace+6-35	3,5	0,052	0,017	0,031	0,063	0,036
	Ace+6-40	4,0	0,063	0,022	0,038	0,080	0,044
	Ace+6-45	4,5	0,073	0,025	0,043	0,093	0,059

Taula 1. Paràmetres de precisió amb SAP per contacte S/N ISO 10360-12 en models ACE i ACE+

1.4.2. FARO MetrologyWorks, Inc.

La segona empresa amb la que s'ha contactat per obtenir-ne informació és la multinacional estatunidenca FARO MetrologyWorks, Inc. Amb seu a Lake Mary, Florida, i més de 25 centrals de fabricació i reducció arreu del món, compten amb una trajectòria de més de 40 anys desenvolupant màquines de mesura i software especialitzat des de la seva creació com a *start-up*. En aquesta direcció disposen de més de cent patents pròpies.

D'entre deu models diferents de BAMC comercialitzats actualment per aquesta corporació, els més

innovadors són els de la gamma *Quantum Max*. Amb la màxima flexibilitat, un rang d'abast major i un efector final redissenyat amb cinemàtica dual, la precisió i la productivitat es maximitzen en més d'un 30% en relació a models anteriors. Segons la pròpia empresa, aquesta gamma presenta el BAMC més ràpid i amb major detall d'escaneig del mercat.

Els tres models *FaroArm* inclosos en la gamma *Quantum Max* ofereixen opcions estàndard, bàsiques i d'excel·lència de rendiment pels seus models *S*, *M* i *E*, respectivament, disponibles en variants de volum de treball de 2 a 4 m³; aparentment, l'opció de 2 m³ esdevé l'opció més precisa del mercat. En relació a models anterior, cada *FaroArm* augmenta un 25% l'abast en comparació al seu homòleg anterior, oferint una articulació més còmodes al voltant de peces més grans. Alhora, es pot combinar l'acció de qualsevol braç amb la instal·lació d'una taula de fixació amb 8 eixos de rotació per assegurar una col·locació única del braç de mesura i evitar el reposicionament i les conseqüents pèrdues de temps.

Existeixen les opcions de 6 i 7 eixos per als models *S* i *M*, mentre que l'*E* es presenta amb 7 eixos exclusivament. Cap d'aquests disposa de bateria integrada, pel que el concepte d'autonomia és inexistent; només funcionen connectats permanentment a una font de corrent de tipus endolls domèstics a tensió mundial universal (100-240V, 47-63 Hz). Per altra banda, disposen de connexió de comunicació per cable o per *WI-FI*.

Aquests BAMC compten amb volums útils de mesura d'entre 2 i 4 m. Alhora, inclouen millores en la rígides i l'estabilitat estructural per oferir una precisió optimitzada i una repetibilitat de mesura amb un rendiment superior sense deixar de banda la robustesa aplicable a l'entorn de fabricació industrial. Així doncs, les precisions que enuncia el fabricant es troben entre 25 i 40 µm.

Envers les articulacions, aquestes són dobles i de gir infinit i incorporen també encòders òptics d'alta precisió; aquestes es troben mecanitzades en alumini i no incorporen contrapesos. Els parells cinemàtics o articulacions dobles permeten un major accés a espais reduïts o zones de difícil accés sense necessitat de recalibratge. Alhora, la subjecció d'alliberament ràpid ofereix opcions de retenció dinàmiques de canvi de sistema d'adquisició de punts. En referència al SAP, aquest pot ser per contacte (palpador) o sense contacte, en forma de sonda d'escaneig. *FARO* ofereix el seu propi dispositiu d'escaneig sota el nom comercial de *FAROBlu*, un aparell òptic amb empunyadura ergonòmica i amb diferents rangs d'escaneig.

Pel que fa als membres o elements del braç, aquests estan fabricats majoritàriament amb materials polimèrics d'alta densitat, el que atorga una rigidesa gran en relació a una massa reduïda.

Pel que fa als preus, en funció del model i el nombre d'eixos amb el que compta, oscil·len entre 12.000 i 26.000 euros, aproximadament.

D'aquesta opció comercial de braços de mesura també se'n disposa de les dades d'abastament lineal i de pes de cada model, recollits degudament en la següent taula:

<i>Quantum Max S, M, E</i>	VUT (m)	Abast màx. (m)	Pes (kg)
7 eixos	2,0	2,60	9,6
	2,5	3,10	9,7
	3,0	3,53	9,8
	3,5	4,10	10,0
	4,0	4,60	10,2
6 eixos	2,0	2,58	9,5
	2,5	3,08	9,6
	3,0	3,50	9,7
	3,5	4,08	9,9
	4,0	4,58	10,1

Taula 2. Característiques bàsiques dels models *Quantum Max S, M, E*

Aquesta empresa distribueix els seus braços junt amb el programari propi *FARO CAM2*, una potent plataforma de mesura tridimensional dissenyada per completar de manera eficient l'assegurament de tasques d'inspecció de qualitat; és perfectament adequat per gestionar la repetició de rutines d'inspecció amb tendència en directe i procés estadístic anàlisi de control. La funció de gestió de peces de repetició del software permet guiar rutines d'inspecció que s'han de programar prèviament al programari. Cada operador pot realitzar exactament la mateixa rutina d'inspecció, minimitzant així la variabilitat i maximitzar la repetibilitat de les mesures. Els registres de dades s'emmagatzemen, s'analitzen i es mantenen digitalment per tal que les tendències siguin identificades i poder prendre les accions adequades quan les mesures comencen a desviar-se de les seves toleràncies nominals.

Construïts en conformitat amb les últimes normes ISO esdevenen màquines punteres en matèria de precisió i productivitat en la mesura. Així doncs, totes disposen de nivell de protecció IP51 i compten, en un rang de temperatures de funcionament de 10°C a 40°C, amb una humitat relativa de fins al 95% i sense condensació, dels següents paràmetres de funcionament:

<i>Quantum Max S</i>	VUT (m)	E _{UNI} (mm)	P _{SIZE} (mm)	P _{FORM} (mm)	L _{DIA} (mm)	SPAT (mm)
7 eixos	2,0	0,031	0,013	0,020	0,045	0,021
	2,5	0,036	0,015	0,024	0,049	0,026
	3,0	0,059	0,020	0,035	0,075	0,043
	3,5	0,070	0,024	0,042	0,089	0,051
	4,0	0,082	0,029	0,048	0,110	0,063
6 eixos	2,0	0,031	0,010	0,015	0,031	0,020
	2,5	0,035	0,013	0,021	0,035	0,026
	3,0	0,044	0,020	0,029	0,052	0,031
	3,5	0,058	0,021	0,034	0,067	0,040
	4,0	0,065	0,026	0,041	0,083	0,053

<i>Quantum Max M</i>	VUT (m)	E _{UNI} (mm)	P _{SIZE} (mm)	P _{FORM} (mm)	L _{DIA} (mm)	SPAT (mm)
7 eixos	2,0	0,030	0,011	0,019	0,044	0,020
	2,5	0,034	0,013	0,022	0,049	0,025
	3,0	0,057	0,020	0,033	0,070	0,041
	3,5	0,070	0,022	0,041	0,085	0,050
	4,0	0,081	0,030	0,046	0,109	0,062
6 eixos	2,0	0,030	0,011	0,013	0,030	0,019
	2,5	0,032	0,013	0,020	0,032	0,024
	3,0	0,041	0,019	0,027	0,051	0,030
	3,5	0,057	0,020	0,034	0,065	0,038
	4,0	0,063	0,024	0,040	0,081	0,050

<i>Quantum Max E</i>	VUT (m)	E _{UNI} (mm)	P _{SIZE} (mm)	P _{FORM} (mm)	L _{DIA} (mm)	SPAT (mm)
7 eixos	2,0	0,031	0,012	0,020	0,043	0,019
	2,5	0,035	0,014	0,021	0,049	0,023
	3,0	0,060	0,018	0,032	0,070	0,040
	3,5	0,067	0,021	0,040	0,081	0,048
	4,0	0,081	0,027	0,045	0,099	0,061

Taula 3. Paràmetres de precisió amb SAP per contacte S/N ISO 10360-12 en models *Quantum Max S, M, E*

Com resulta evident, no s'ha pogut aprofundir més en matèria de detalls constructius ni tecnologies aplicades. Per motius comercials i de competència, tant l'empresa *Kreon Technologies* com les altres companyies consultades han fet palesa la seva negativa alhora de permetre l'accés a informacions tècniques en relació al disseny dels seus aparells més enllà dels paràmetres purament comercials. Tampoc s'han volgut comunicar els preus de venda oficials i específics per a cada model, sinó que s'ha proporcionat un interval quantitatiu que s'ha contrastat amb altres consultes comercials.

1.4.3. Anàlisi de mercat aplicat al projecte

A partir de les propietats dels diferents models analitzats en l'apartat anterior es pot realitzar la següent taula resum (*Taula 4*) per recollir i comparar les característiques funcionals i estructurals dels models de BAMC més comercialitzats:

Fabricant	KREON		FARO		
Gamma	ACE		Quantum Max		
Models	ACE	ACE+	S	M	E
VUT (m)	[2, 5]	[2,5 , 4,5]	[2, 4]	[2, 4]	[2, 4]
Massa (kg)	-	-			
Nº eixos	6/7	6/7	6/7	6/7	7
Tecnologia articulacions	<ul style="list-style-type: none"> - Encòders òptics alta precisió - Gir infinit - Contrapesos - Alumini lleuger 		<ul style="list-style-type: none"> - Encòders òptics alta precisió - Dobles - Alumini 		
Materials cos	<ul style="list-style-type: none"> - Fibra de carboni - Resina polimèrica 		<ul style="list-style-type: none"> - Polímer d'alta densitat 		
Bateria	Sí (5h aut.)	Sí (5h aut.)	No	No	No
Connectivitat	Cable/WI-FI	Cable/WI-FI	Cable/WI-FI	Cable/WI-FI	Cable/WI-FI
Preu	14.000 – 24.000 €		12.000 – 26.000 €		

Taula 4. Taula comparativa entre marques analitzades de BAMC

Per altra banda, a partir de les dades de les *Taules 1, 2, 3* es poden generar una sèrie de gràfiques que ajuden a visualitzar i extreure diverses conclusions envers un possible disseny de braç articulat de mesura per coordenades. Aquestes gràfiques (*Fig. 11*) il·lustren la variació dels diferents paràmetres envers la precisió, d'acord amb la norma ISO 10360-12, en funció del model de braç articulat, el nombre d'eixos o graus de llibertat que incorpora i el seu volum útil de mesura, per a cadascun dels models analitzat en l'apartat anterior.

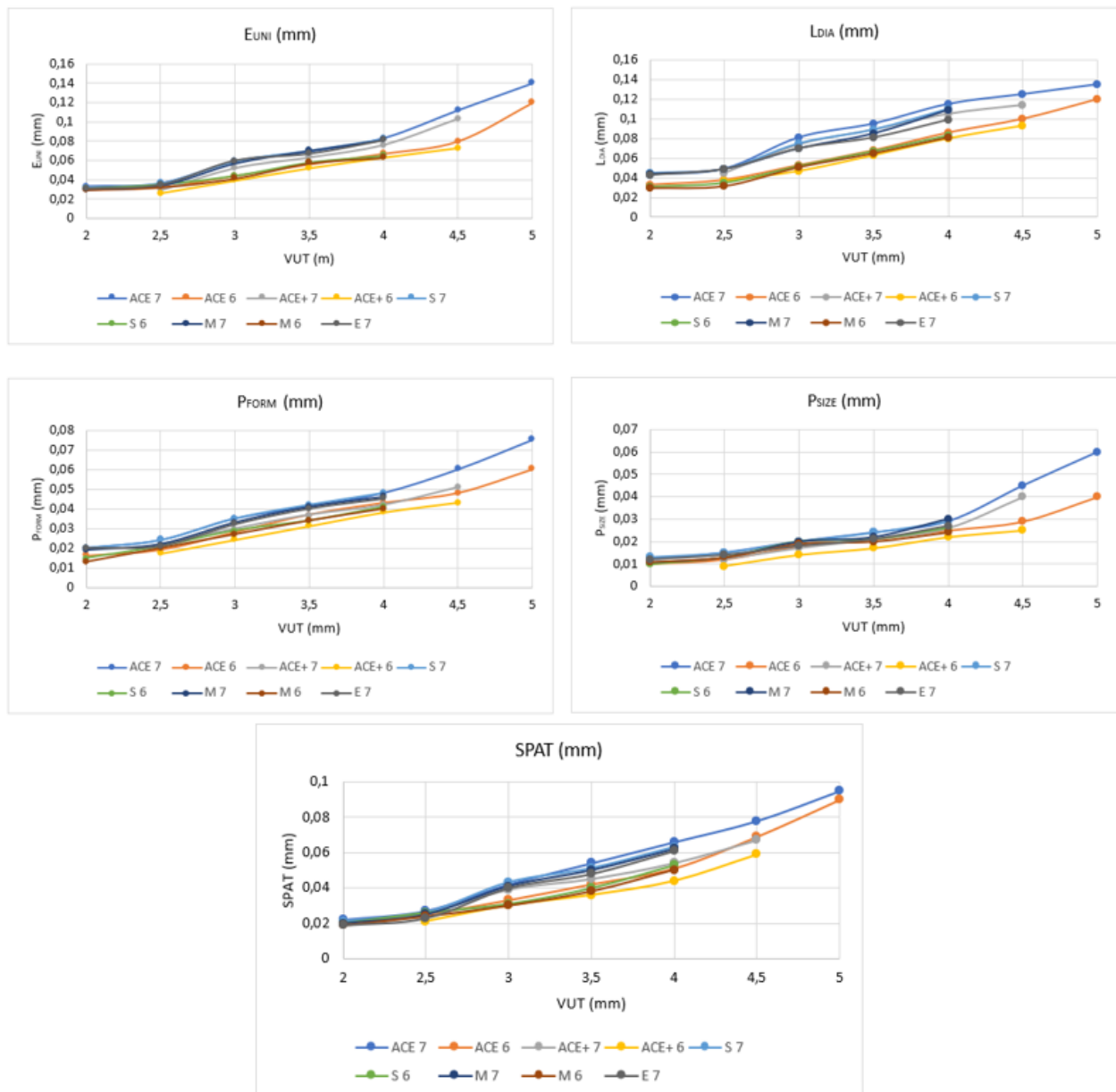


Fig. 11 Gràfiques d'anàlisi dels models de BAMC en el mercat

Com es pot observar clarament, tots els paràmetres tenen una tendència similar. Per tant, la relació entre la precisió en la mesura d'un BAMC i la seva estructura constructiva es pot resumir en les següents tres afirmacions en base a les dades comercials analitzades:

1. Per a un mateix model, a major nombre d'articulacions (eixos o graus de llibertat) menor és la precisió en la mesura.
2. Per a un mateix model, a major volum útil de mesura, s'obté una precisió en la mesura inferior.
3. Per grans volums útils de mesura (4 - 5 m) i un nombre elevat d'eixos (7) el creixement de la imprecisió es dispara.

De totes maneres, cal tenir en compte que les imprecisions tractades en aquest apartat, pròpies dels models comercials de BAMC analitzats, ronden valor majoritaris compresos entre 0,01 mm i 0,08 mm. Només en braços de 7 eixos i volums de mesura útils de més de 4 m es superen els 0,1 mm d'error màxim permisible en la mesura. Tanmateix, una precisió de $\pm 0,1$ mm és un dels objectius funcionals que es volen assolir en el braç articulat que es desenvoluparà en aquest projecte.

1.5. Estudi de processos

En aquest apartat s'introdueixen les tecnologies i els procediments que es desenvoluparan i aplicaran durant la fabricació del BAMC en les properes etapes de la present memòria. Una visió global i entenedora dels processos de fabricació implicats en el projecte permetrà una aplicació ferma de les condicions i els paràmetres constructius determinats.

En qualsevol cas, la finalitat última d'aquesta part de la memòria és la d'assegurar la comprensió dels processos de fabricació implicats en el procés de materialització del braç articulat de mesura així com l'exposició de les seves característiques i dels el motius que han provocat l'elecció de cadascuna d'aquestes tecnologies. Tanmateix, tots els detalls tècnics envers les diferents fases, operacions i els paràmetres de control corresponents de cada procés es troben definits i recollits convenientment en l'apartat 5. *Plec de Condicions*.

1.5.1. Impressió tridimensional

El primer dels processos de fabricació projectats és la *impressió tridimensional* o *impressió 3D*. Aquesta tecnologia ha irromput durant la darrera dècada com la tecnologia de fabricació per addició més innovadora i revolucionària d'entre els processos industrials disponibles en el mercat. Basat en la generació d'objectes sòlids tridimensionals per la superposició de capes successives de material, és un procediment que permet velocitats de fabricació més altes, costos inferiors i major facilitat en l'ús, eliminant utilitatges i elements auxiliars, respecte d'altres tècniques. Les impressores 3D ofereixen als desenvolupadors d'un producte la capacitat per imprimir parts i/o muntatges ja ensamblats, amb moviment relatiu entre components, en base a diferents materials amb propietats físiques i mecàniques diferents directament a partir d'un model tridimensional CAD.

Les opcions materials possibles van des de les resines fotopolimeritzades fins a la fotosinterització de polvoritzats metàl·lics passant pels habituals polímers conformats tèrmicament per deposició fosa i, fins i tot, pels teixits biològics cel·lulars, cobrint una gran amplitud d'aplicabilitats i propietats. Tot això permet fabricar des de zero productes personalitzats que s'ajusten a les necessitats de cada usuari implementant la personalització en massa com a una de les tendències en el desenvolupament de productes i útils. Les tecnologies avançades d'impressió poden oferir fins i tot models que poden servir com a prototips funcionals o directament productes destinats al mercat. Des de la seva aparició, hi ha hagut un gran augment en la venda d'impressores tridimensionals i una reducció inversament proporcional en el seu preu. S'ha convertit doncs, en una tecnologia de fabricació accessible, assequible i altament versàtil, capaç d'implementar-se en diversitat d'àmbits. Per tots aquests motius el seu ús s'ha estès arreu dels camps productius de la indústria tèxtil, l'enginyeria i el disseny industrial, l'arquitectura i l'edificació, l'automoció, la indústria farmacèutica, la sanitària i un llarg etcètera.

Tot i l'existència de diverses tecnologies d'impressió 3D, la immensa majoria d'elles es basen en uns principis generals comuns. Habitualment, el material de fabricació es deposita, solidifica i fixa

successivament en plans virtuals realitzats a partir d'un model de disseny assistit per ordinador que la màquina utilitza com a guia per a la impressió. El material es deposita inicialment sobre una plataforma de construcció i es va abocant fins que el model tridimensional esdevé imprès.

1.5.1.1. Modelat per deposició fosa (FDM)

Seguint la dinàmica de reducció de costos i simplificació del procés constructiu del braç articulat de mesura, tendència coherent en un procés de prototipat, s'ha optat per aplicar el modelat per deposició fosa o FDM (de l'anglès *Fused Deposition Modeling*) com a tècnica d'impressió tridimensional. Usant material polimèric (termoplàstic) en filaments prèviament extruïts i bobinats, aquesta tecnologia additiva utilitza una tovera a alta temperatura per dipositar el material fos sobre una estructura de suport o plataforma, generalment en sentit horitzontal, capa a capa. Cada capa pot estar formada per un únic objecte, per objectes independents o per objectes lligats entre ells. No és possible una vegada que s'ha imprès una capa, baixar en alçada per imprimir una capa inferior. Aquest sistema és molt habitual en processos de prototipat i, atès el seu baix cost, s'ha popularitzat molt a nivell domèstic; s'ha democratitzat, doncs. Tanmateix, resulta difícil dipositar a l'aire una capa que no tingui suport més enllà d'una certa dimensió; el suport ha de ser o bé la plataforma inicial o una capa anterior.

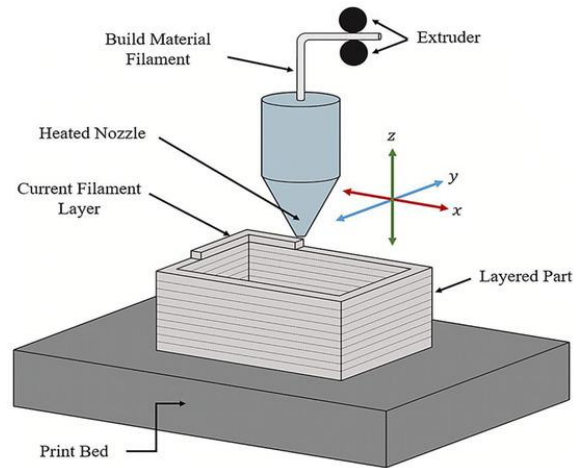


Fig. 12 Esquema del procés d'impressió FDM

Per solucionar aquest inconvenient es poden afegir estructures auxiliars temporals que no formen part de l'objecte com a tal i que es retiren una vegada finalitza la impressió.

Estructuralment, les impressores que funcionen per la tècnica de deposició fosa tenen una disposició similar, podent-se diferenciar diverses parts:

- **Plataforma:** també coneguda com placa d'impressió o llit, és la superfície de temperatura regulable on s'aplica la capa inicial de la impressió i que permet la subjecció de la peça per mitjà d'un augment de temperatura.
- **Estructura de suport:** és el xassís que permet el moviment de les parts mòbils i manté els components units.
- **Eixos:** acostuma a haver-hi un eix mòbil per a cadascuna de les tres dimensions de l'espai (x, y, z); a través d'aquests es desplaça el fusor, que va annexat al capçal junt amb la unitat de refrigeració per aire (ventilador), normalment.
- **Extrusor:** és la tovera encarregada de propulsar el filament cap al fusor.
- **Fusor (nozzle):** és la tovera a alta temperatura situada al capçal que fon el filament per abocar-lo a la capa d'impressió corresponent.
- **Suport per al bobinat:** permet la subjecció i el subministrament del material.
- **Electrònica de control i pantalla:** és el sistema auxiliar que s'encarrega de regular el funcionament de la impressora i de permetre la interacció entre l'aparell i l'usuari per mitjà d'un software de funcionament.
- **Font d'alimentació:** proveeix d'energia elèctrica a totes les parts funcionals i protegeix tant l'aparell com la instal·lació de sobrecàrregues sobtades.

El control del moviment del capçal de les impressores tridimensionals d'FDM, així com l'establiment dels paràmetres d'impressió, respecten el procés i els formats exposats en el següent apartat.

1.5.1.2. Software i formats de comunicació en FDM

En el procés de fabricació de modelat per deposició fosa hi intervenen diferents agents en termes de programaris utilitzats i formats d'arxiu en la comunicació entre aquests. En l'apartat 7. *Plec de Condicions* s'estableixen quin són els softwares i formats utilitzats durant el desenvolupament d'aquest projecte. Amb això, resulta convenient fer-se una idea inicial de quin paper juga cadascun d'aquests elements i com es relacionen entre si.

En qualsevol cas, la impressió tridimensional parteix sempre d'un model de representació tridimensional de sòlids, de tipus computacional, que s'elaborarà a través d'un programari de CAD. Per mitjà d'aquesta eina s'establiran les mesures, cotes i característiques dimensionals i formals de cada peça a fabricar.

Tot i que cada programari de modelat de sòlids disposa del seu propi format d'arxiu, n'existeix un que permet la relació coordinada entre softwares comercials diferents. Es tracta del format *.STEP* (de l'anglès *Standard for the Exchange of Product Data*) o també conegut com ISO 10303 en relació a la normativa que el regula.

Per altra banda, el funcionament de les d'impressores 3D està lligat al seguiment d'un programa de on s'assignen i controlen els moviments que efectua el capçal (per mitjà de motors pas a pas). Per obtenir aquest programa, es poden fer servir diferents programaris de tall, també anomenats *slicers*, on es carreguen els dissenys creats a partir del software CAD. Els programaris de tall permeten fixar la temperatura d'extrusió, el flux, el gruix de capa, la refrigeració del material i molts altres paràmetres d'impressió que esdevenen molt rellevants a l'hora de dissenyar el procés productiu; alhora tenen implicacions directes en la tolerància, la qualitat i l'acabat de fabricació.

Per passar del model tridimensional al programari de tall, una interfície estàndard de comunicació de dades entre el software CAD i l'*slicer* és el format d'arxiu *.STL* (de les sigles en anglès *STereo Lithography*). Aquest és un format d'arxiu informàtic de disseny assistit per ordinador que defineix la geometria d'un objecte tridimensional excloent informació com el color, les textures o les propietats físiques que sí inclouen altres formats; això fa que sigui de dimensions d'emmagatzematge més reduïdes i la seva transmissió més àgil. Alhora, s'aproxima a la forma del model sòlid utilitzant capes horitzontals, la dimensió de les quals afecten directament a la qualitat de la representació i, per tant, de la impressió.

Així mateix, la comunicació entre l'*slicer* i la màquina d'impressió es dona per mitjà del format d'arxiu *.g.code*, que seria l'equivalent al codi de control numèric en les màquines de mecanitzat automàtiques.

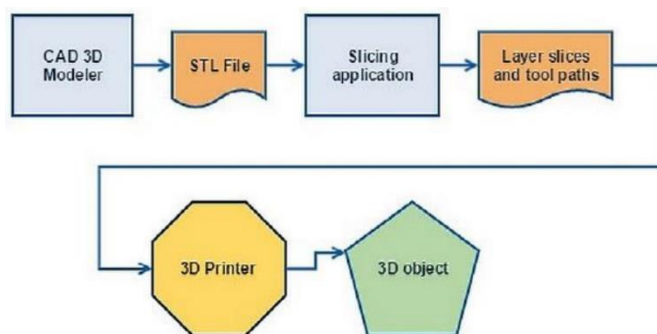


Fig. 13 Flux de treball típic en la impressió per FDM

1.5.1.3. Paràmetres d'impressió

Per mitjà dels software de tall o *slicers* es poden modificar i fixar una multitud de variables en relació al procediment d'impressió per deposició fosa en termes d'acabats, resistència estructural, resolució i toleràncies dimensionals. Tenint en compte que l'objecte d'estudi desenvolupat en aquest projecte és una màquina de mesura tridimensional, les condicions i prestacions constructives dels components del propi aparell esdevenen elements de summa rellevància per assegurar el correcte funcionament del mateix. Els valors paramètrics fixats, així com les especificacions constructives es recullen degudament en l'apartat 7. *Plec de Condicions*. Tanmateix, en aquest punt de la memòria es definiran i exposaran breument aquests paràmetres, l'aspecte de la peça en que intervenen i les implicacions que tenen. El valor de cada variable anirà sempre en funció del tipus de peça i del material utilitzat per a la impressió.

1. **Qualitat d'impressió:** aquest primer grup de variables es basa en l'ajust de l'espessor de la capa d'impressió en funció de les característiques de cada equip (impressora) o en funció de preferències pròpies. Mentre més petit sigui el gruix de la capa, major serà la resolució vertical de la impressió. Tanmateix, això afectarà directament al temps d'impressió augmentant-lo.
 - i. **Amplada de línia (*line width (mm)*):** equival al diàmetre de sortida del material en el fusor o *nozzle*.
 - ii. **Alçada de capa inicial (*initial layer height (mm)*):** és el gruix material de la primera passada de la impressora. El seu valor es relaciona amb el diàmetre del fusor o amplada de línia, essent idealment la meitat d'aquesta. A major gruix, dificulta l'assentament de la peça sobre la plataforma d'impressió.
 - iii. **Alçada de capa (*layer height (mm)*):** és el gruix de les passades conseqüents de la impressora. Acostuma a tenir el mateix valor que l'alçada inicial. A menor alçada, major és el detall (qualitat) d'impressió, però també augmenta la quantitat de material i el temps empleats.
2. **Parets:** les parets esdevenen els límits físics amb l'ambient exterior que separen la part interna de la part externa de les peces impreses. La interna té una funcionalitat purament estructural, pel que no es busca un aspecte cuidat, sinó una configuració amb unes propietats mecàniques determinades. Contràriament, la part exterior delimitada per les parets sí que té un component d'acabat estètic molt important.
 - i. **Espessor de paret (*shell thickness, wall thickness (mm)*):** es refereix a l'espessor que tindran les parets de l'objecte imprès. En el cas d'un objecte completament sòlid, és comú que la peça no s'imprimeixi completament massissa, sinó que es construeixi una closca amb una estructura interna. Aquest paràmetre controlarà l'espessor que tindran les cares externes de la peça. En el cas d'objectes buits, aquest paràmetre s'haurà d'ajustar d'acord amb el gruix de paret del mateix, i mesurarà sempre múltiples del diàmetre de sortida del fusor. A major espessor, major rigidesa però més temps i material caldran per a una mateixa impressió.
 - ii. **Recompte de línies de paret (*wall line count*):** és el nombre de passades consecutives que formen una paret. El producte d'aquest nombre per l'amplada de línia, o el diàmetre del fusor, donarà com a resultat l'espessor total de paret.

- iii. **Expansió horitzontal (mm):** esdevé la longitud (positiva o negativa) que l'extrusor s'ha de distanciar envers la cota nominal del model tridimensional de la peça. Així doncs, és un paràmetre que serveix per solucionar problemes de contracció o dilatació dimensional així com de toleràncies pròpies del procés d'impressió.
 - iv. **Capas a la part superior o inferior del model (*top/bottom thiknes, top/bottom solid layers*):** aquest paràmetre es refereix al nombre de capas que tindran les cares horitzontals del model en la seva part superior. Aquesta opció fa variar la rigidesa d'aquestes cares. En el cas de peces buides, aquest gruix coincideix amb el gruix de paret de la peça.
 - v. **Gruix superior o inferior (mm):** aquest paràmetre es refereix l'espessor que tindran les capas horitzontals en la paret superior i inferior de la peça. Aquesta opció afecta a la rigidesa i la resistència, entre altres propietats mecàniques de l'element imprès.
- 3. Farciment:** pel que fa a les propietats mecàniques, el farciment esdevé el factor diferencial en l'àmbit de les impressions 3D. La seva modificació en termes de densitat o d'organització té repercussions molt significatives en la capacitat resistent de les peces impreses i en la tipologia de sol·licitacions que són capaces de suportar.
- i. **Densitat de rebliment (*infill density (%)*):** aquest paràmetre percentual es refereix al farciment que s'utilitzarà com a estructura interna en el cas d'objectes completament sòlids (farcits), permetent estalviar material i disminuir el pes de la peça. La impressora, a través de l'*slicer* o software de tall, crearà una estructura reticular interna, buida en major o menor mesura. La densitat d'aquesta es controlarà de forma percentual, essent el 100% equivalent a una peça totalment massissa. És important tenir en compte que el percentatge de rebliment té efectes destacables en la resistència final de la peça, el pes i el temps d'impressió; tanmateix, l'aparença exterior no es veurà afectada.
 - ii. **Patró de rebliment (*infill pattern*):** és la tipologia estructural en la que es desenvoluparà el rebliment de la peça, és a dir, la disposició o ordenació específica en la que les successives capas de material es van dipositant. Els més habituals són el triangular, l'hexagonal, el quadrat o el giroide.
- 4. Suports:** els suports són estructures de caràcter temporal que s'afegeixen a la peça durant el procés d'impressió per ajudar a suportar les seves parts sortints o en voladís. Això és especialment important per a les peces amb geometries complicades, com ara aquelles amb voladissos, ponts o forats inclinats, ja que aquests elements poden ser difícils de mantenir sense suports durant la impressió.
- Els suports es poden crear automàticament pel programari de l'impressor 3D o manualment per l'usuari, depenent de la configuració de la impressora i de les preferències de l'usuari. Els suports es retiren després de la impressió, deixant només la peça final.
- Els suports són normalment impresos amb el mateix material que la peça, però en una configuració de menor densitat o espessor, per a facilitar la seva eliminació.
- i. **Tipus de suport (*support type*):** en peces amb estructures en voladís, tal i com ja s'ha explicat, es necessiten imprimir estructures temporals de suport. Les tipologies més

habituals són les estructures reticulades (*grid*) o les lineals esglaonades; l'estructura reticulada es forma per geometries quadrangulars mentre que la lineal es forma per línies paral·leles entre sí, orientades cap al frontal de la impressora, normalment. En alguns equips existeix una major diversitat de tipus d'estructures de suport.

- ii. **Suports de plataforma (*support placement*):** és un paràmetre qualitatiu que controla si es generen estructures de suport en totes les parts de la peça que ho necessiten o només en aquelles en les que l'estructura de suport es fonamentarà sobre la plataforma o base de la impressió. Cal tenir en ment que els suports generats sobre la pròpia peça no són molt estables i perjudiquen l'acabat superficial final. Un canvi de posició d'impressió pot donar resposta a problemàtiques relacionades amb aquest aspecte.
 - iii. **Angle de suport (*support angle (°)*):** aquest factor numèric estableix la cota mínima d'angle de paret a partir de la qual el software de tall generarà suports estructurals. Aquest angle es mesura sempre a partir de la plataforma d'impressió.
 - iv. **Densitat de suport (*support density (%)*):** és la variable que controla la densitat o quantitat de suport a construir dins de cadascuna de les àrees que requeriran suport. Normalment no es fan servir percentatges majors al 20% pel fet que, percentatges superiors, dificulten molt el despreniment de la peça.
5. **Suport de base:** en la impressió tridimensional per FDM resulta especialment important la correcta adhesió de les capes inicials sobre la plataforma d'impressió. De fet, una fixació defectuosa pot implicar la malmesa de la totalitat del procés i de tota la peça, doncs. Per això, tot i que es pot considerar englobat en el grup de paràmetres de suport, se'n fa incís de forma individualitzada.
- i. **Tipologia d'adherència de base (*build plate adhesion*):** aquest paràmetre estableix el tipus de suport de base que es construirà per a la peça. El suport de base serveix per afegir àrea de contacte entre la taula o plataforma d'impressió i la peça, fent que sigui més difícil que aquesta es desprengui durant la impressió evitant problemes de subjecció. També existeix l'opció de que la peça s'imprimeixi sense una base (*none*), i és una bona opció per a peces la part inferior de les quals és àmplia, pel que tindran una gran superfície de contacte amb la plataforma. Hi ha diversos tipus de base, depenent del programari, però els més comuns són *skirt*, *brim* i *raft*.
 - ii. **Densitat de la base (*brim, raft o skirt density (%)*):** aquesta variable controla la densitat de material que portarà el suport de base modificant la separació entre línies impreses.
6. **Material:** el tipus de filament utilitzat per a realitzar una impressió tridimensional per modelat per deposició fosa és el condicionant principal envers les temperatures de treball de l'equip i el flux de sortida de material. Alhora, com no pot ser d'altra forma, el material influirà directament en les propietats físiques i químiques de la peça resultant.
- i. **Temperatura d'impressió (*print temperature (°C)*):** és la temperatura a la que es troba el fusor de la impressora i a la que es fon el filament quan hi passa. Un excés de temperatura provocarà que el material assoleixi un estat massa poc viscos, molt líquid; contràriament, una temperatura inferior a la recomanada causarà que el flux de material

es vegi interromput i que l'adhesió entre capes no sigui idònia. Per tant, és recomanable respectar les temperatures indicades pels fabricants del filament que s'utilitzi.

- ii. **Temperatura de la placa d'impressió (*base temperature* (°C)):** és la temperatura a la que es manté la plataforma d'impressió i que permet la subjecció de la base de la peça evitant un refredament excessiu de la capa inicialment depositada i una conseqüent contracció del material; aquest fenomen es coneix com *warping*.

És una paràmetre estretament relacionat amb el suport de base. Per estalviar energia, es pot intercanviar per la temperatura de la placa en la capa inicial (*initial layer temperature*), refredant-se completament la plataforma d'impressió un cop s'ha efectuat la primera capa.

- iii. **Flux (*flow* (%)):** és la quantitat de material per unitat de temps que passa a través d'una secció concreta, a través del diàmetre de sortida del fusor, en aquest cas. A major flux, menor serà el detall i l'acabat de la impressió, però s'estalviarà en temps i energia.

- 7. **Velocitat d'impressió (mm/s):** la velocitat d'impressió determina la rapidesa en que es mou el capçal de la impressora que incorpora el fusor per on s'aboca el material fos. Així doncs, depèn de diversos factors, com ara la mida i complexitat de la peça, la resolució o qualitat desitjades, el material, etc. Tanmateix, és evident que utilitzar velocitats d'impressió massa altes pot afectar negativament la qualitat de les peces. Contràriament, amb velocitats innecessàriament baixes pot augmentar excessivament el temps d'impressió, amb l'increment de costos que això implica.

1.5.2. Mecanitzat per arrencament d'encenalls

El segon gran tipus de procés de fabricació projectat per a la materialització del BAMC dissenyat és el mecanitzat per arrencament d'encenalls. El mecanitzat es basa en conformar una peça en la seva forma definitiva per mitjà de la incisió d'una eina que provocarà arrencament de material el forma d'encenalls. Així doncs, es tracta d'un procés de fabricació de disminució de la cohesió. En aquest cas, les operacions de mecanitzat s'aplicaran exclusivament en els passadors metàl·lics que el disseny de les articulacions preveu, i en els tubs plàstics que conformen l'estructura general. Tot i que es tracta d'un conjunt de peces relativament senzilles, amb una geometria molt simple, la seva fabricació té una importància molt gran en relació al correcte funcionament del braç i, en conseqüència, amb les mesures que s'hi puguin realitzar.

El mecanitzat és un procés pel qual s'obté la geometria d'una peça mitjançant l'arrencada de material excedent utilitzant màquines i eines tallants. Les màquines utilitzades en el mecanitzat que efectuen l'arrencada de material s'anomenen *màquines eina*.

Aquest tipus de processos s'acostumen a aplicar sobre materials metàl·lics, sobretot, però també en polímers (termoplàstics) i certs materials composts (compòsits).

Generalment, es parteix d'una peça semi elaborada que s'ha obtingut mitjançant altres



Fig. 14 Procés de mecanitzat per tornejat

processos de fabricació, per acabar obtenint peces amb toleràncies dimensionals finals molt petites i acabats superficials de gran qualitat.

Els procediments de mecanitzat es basen en una interferència física en l'espai entre l'eina i la peça, i un moviment relatiu entre ambdues, generat per l'eina, per la peça o per ambdues alhora, possibilitant l'arrencament de material en forma de ferritja. Així doncs, hi ha d'haver penetració o indentat d'una eina, de material més dur, en la peça a mecanitzar [7].

Bàsicament hi ha tres moviments relatius a partir dels quals es configuren diferents tipus de mecanitzat. Cadascun d'aquests moviments es caracteritza per un paràmetre o condició de tall concret. Segons la modificació d'aquests moviments, s'assoliran peces amb característiques determinades. Aquests moviments són:

- a. **Tall:** és la trajectòria de moviment ràpid. Produeix l'arrencada de material i es caracteritza per la velocitat de tall (v_t) o per la velocitat de gir (n).
- b. **Avanç:** és la trajectòria del moviment lent, que defineix la posició relativa entre eina i peça. Defineix el desplaçament relatiu del punt de contacte eina – peça i es caracteritza per la velocitat d'avanç (v_a) o per l'avanç (a).
- c. **Penetració o ajust:** és el moviment d'incidència pròpiament entre eina i peça. Indica i situa l'eina en la posició de tall i defineix la quantitat de material que s'arranca. És un moviment que permet el tall d'un gruix determinat de material i es caracteritza per la profunditat de passada (p).

En funció de com s'apliquin aquests moviments relatius i de quin agent l'efectui (eina o peça), es provocarà una o una altra operació (trepanat, raspallat, tornejat, etc.). Per exemple, si s'apliquen els dos a l'eina, immobilitzant la peça es tenen operacions de serrat o de trepanat; si s'apliquen els dos a la peça, immobilitzant l'eina es dona un raspallat; si un moviment s'aplica a l'eina i l'altra s'aplica a la peça s'obtenen operacions o grups d'operacions més complexes, com el tornejat o el fresat. Alhora, en funció de les trajectòries – les direccions d'aquestes – dels moviments de tall i d'avanç, s'obtenen geometries superficials diferenciades; si les dues són rectilínies i coplanàries, en el mateix pla, s'obté una superfície plana (per exemple en el llimat o raspallat, entre altres); si una trajectòria és circular i l'altra és rectilínia, i són coplanàries, s'obté una superfície plana (per exemple en el refrentat, el fresat, etc.); si una és circular i l'altra és rectilínia però es troben en plans perpendiculars, es poden obtenir superfícies còniques, cilíndriques i helicoidals (per exemple en el tornejat, el roscat, etc.).

Per altra banda, les possibles operacions amb qualsevol tipus de procés de mecanitzat, i conseqüentment la qualitat superficial obtinguda, s'agrupen en tres classes:

- a. **Desbastat:** són operacions que s'apliquen quan es vol treure la màxima quantitat de material possible d'una peça en brut en el mínim temps possible, sense atenció en l'acabat i per arrencament d'encenalls. Es busca aproximar la peça a la dimensió final en el menor temps possible amb una profunditat de passada de gran magnitud i a velocitat de tall i d'avanç altes. La capa de material entre les dimensions obtingudes i les acotades s'eliminarà per mitjà d'operacions d'acabat.
- b. **Acabat:** són operacions utilitzades per obtenir la mida final de la peça i una bona rugositat i acabat superficial. Per a fer-ho doncs, s'apliquen profunditats de passada reduïdes, velocitats de tall molt elevades i velocitats d'avanç baixes per arrencar encenalls

- c. **Súper acabat:** és un tipus d'operació que s'aplica en casos especials i que no es considera normalment. S'enfoca a obtenir acabats de molt alta qualitat per mitjà del despreniment de partícules, no encenalls. Les profunditats de passada són mínimes, i les velocitats de tall i d'avanç són elevades.

Les diferents operacions, fases, eines i utilatges utilitzats s'indiquen en les corresponents 4.6. *Fulles de ruta de mecanitzat*. Per mitjà d'aquests dos documents referenciats, els diferents processos de mecanitzat queden definits totalment. Tanmateix, en el present projecte no es contempla el càlcul implícit de les condicions i els temps de tall per evitar caure en complexitats innecessàries; els processos de mecanitzat projectats són mínims i només s'apliquen en la fabricació parcial de 2 peces.

En els següents apartats només s'exposen els processos de mecanitzat per arrencament d'encenalls que es projectes aplicar en la construcció del BAMC.

1.5.2.1. Tallat

El primer procés de fabricació de mecanitzat projectat és el tall per mitjà de serra de cinta automàtica. El tallat és el procés de mecanitzat per arrencament d'encenalls utilitzat per tallar i separar la peça en diferents parts. També serveix per obtenir una superfície plana en una peça. Així doncs, pot ser tant una operació de desbast com d'acabat, si la superfície tallada no es modifica.

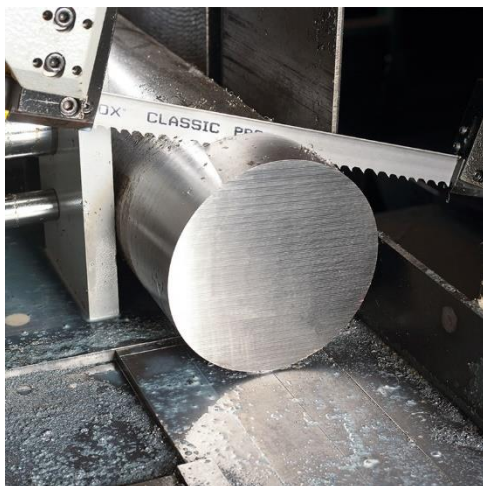


Fig. 15 Tallat amb serra de cinta automàtica

En aquest procediment la màquina eina, la serra, realitza per mitjà de la seva fulla dentada ambdós moviments (moviment de tall i d'avanç), mentre que la peça es manté fixada i immòbil sobre la bancada. El moviment de tall és el generat pel pas circular de la fulla o serra, mentre que l'avanç ve donat per l'acció de l'operari o de forma automàtica en moure's la serra perpendicularment en relació a l'eix longitudinal de la peça per la secció de tall. Tot i la simplicitat d'aquesta metodologia de mecanitzat, només es pot realitzar l'operació de tallat i, alhora, presenta una tolerància força destacable que anirà sempre en funció del gruix de la serra dentada utilitzada.

Habitualment, aquesta tolerància dimensional es situa al voltant dels $\pm 1,5$ mm. Així doncs, aquest factor s'haurà de tenir en compte a l'hora d'implementar aquest tipus de procés de fabricació.

Per altra banda, tot i que hi ha diferents tipus de serres, la més habitual acostuma a ser la serra de cinta. De fet, per aquest projecte es preveu l'ús d'una serra de cinta de sobretaula amb una serra dentada (DIN 1837 A). Aquesta s'utilitzarà per tallar el format tubular d'alumini original en segments més petits a partir dels quals es pugui mecanitzar la forma definida de cadascun dels passadors prevists en el disseny de les articulacions cicloïdals. També s'aplicarà en els tubs de PVC que conformaran l'estructura general.

En el cas dels passadors d'alumini, cal tenir en compte que el torn convencional utilitzat per a mecanitzar els passadors en la propera fase de mecanitzat té unes dimensions determinades; alhora, el tornejat de peces excessivament llargues podria certes implicar dificultats, sobretot envers el manteniment de coaxialitat i de la simetria radial, o de la perpendicularitat dels plans mecanitzats desitjats.

1.5.2.2. Tornejat

El segons i principal procés de fabricació de mecanitzat projectat és el tornejat per mitjà de torn convencional. Aquest procés s'usa per obtenir, bàsicament, peces o superfícies de revolució, amb simetria radial, doncs, i per acció manual d'un operari.

El mecanitzat per tornejat és una tecnologia de fabricació altament precisa i eficient, que pot ser utilitzada per produir peces en volums elevats amb una gran precisió i acabat superficial. El procés és adequat per a la producció de peces amb diàmetres que van des de mil·límetres fins a metres, i és capaç de produir peces amb toleràncies extremadament ajustades. Corresponentment, per mitjà del tornejat s'assolirà la forma geomètrica final dels passadors metàl·lics de les articulacions del BAMC. En aquest procediment, es donen els tres moviments típics del mecanitzat de forma diferenciada; la peça realitza un moviment de tall, a alta velocitat i de tipus rotatori al voltant del seu propi eix, mentre que l'eina es desplaça i realitza un moviment d'avanç, més lent, longitudinal i perpendicular (o paral·lel) a l'eix de rotació de la peça. Alhora, l'eina també fa el moviment de penetració de forma radial. Així doncs, només hi ha un sol punt de contacte o tall entre l'eina i la peça.

Segons la configuració dels tres moviments descrits, es poden realitzar diferents tipus d'operacions (cilindrat, refrentat, roscat, etc.). Totes aquestes es realitza per mitjà de la subjecció de la peça en un dels seus propis eixos de revolució, generant mecanitzats cilíndrics concèntrics o bé perpendiculars a un eix de rotació, tant exteriors com interiors.

En el grup de materials que es poden mecanitzar per tornejat s'inclouen els metalls, molts polímers (termoplàstics) i certs materials compostos d'ànima susceptible al mecanitzat. En conseqüència, els paràmetres o condicions de tall que s'utilitzen en el mecanitzat per tornejat dependran del material de la peça, la seva duresa i altres propietats físiques.

En general, el mecanitzat per tornejat és una tècnica de fabricació altament valuosa que pot ser utilitzada per produir peces de treball d'alta qualitat en una gran varietat de materials i geometries.

1.5.2.3. Torn, operacions de tornejat, eines i utilitatges

La màquina eina de la que se'n projecta la utilització és un torn paral·lel convencional, i es conforma per diverses parts que convé conèixer [7]:

- a. **Bancada:** és la part més gran de la màquina, que suporta la resta dels elements del torn, proporciona rigidesa i evita moviments ni vibracions no desitjades.
- b. **Capçal fix:** és on s'allotja l'eix principal encarregat de fer la rotació i de provocar el moviment de tall. També és on s'hi acobla la peça mecanitzada.
- c. **Capçal mòbil:** serveix per suportar peces de grans dimensions o molt pes. També serveix per fer forats a la part frontal de la peça concèntrics amb el seu eix de rotació atès que es pot col·locar una broca per foradar l'eix de gir o aixella de la peça mecanitzada o per situar un contrapunt de suport per a la peça.
- d. **Carro portaeines:** subjecta l'eina i possibilita el moviment d'avanç d'aquesta; es pot moure perpendicular o paral·lelament a l'eix de gir de la peça mecanitzada. Per moure l'eina en diagonal es fa servir el charriot.

Alhora, d'entre els diferents sistemes de subjecció de la peça possibles, i donat que no es preveu realitzar cap operació d'acabat, s'utilitzarà el plat universal de tres garres. Aquest és el sistema més

comú i el que acostumen a incorporar els torns convencionals de forma predeterminada. Es forma per una sèrie d'esglaons circulars concèntrics amb tres punts de subjecció que es desplacen concèntricament de forma coordinada. Permet subjectar gairebé qualsevol tipus de peça gràcies a la

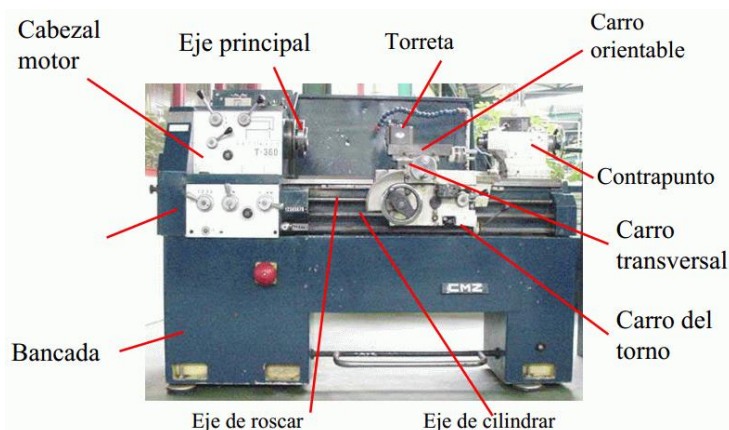


Fig. 16 Parts funcionals d'un torn convencional

indentació en el material causada per la petita superfície de contacte entre garra i peça.

D'entre les diferents operacions de mecanitzat possibles que es poden efectuar per mitjà del tornejat, les que s'utilitzaran per donar forma als passadors de les articulacions del BAMC són el refrentat i el xamfranat. Alhora, per a cadascuna d'aquestes dues operacions de tornejat, es farà ús d'una tipologia d'eina diferent:

- a. **Refrentat:** en aquest cas, l'eina es desplaça perpendicularment (moviment d'avanç) a l'eix de gir de la peça, que es troba girant a alta velocitat (moviment de tall), mecanitzant-se una superfície totalment plana i perpendicular a aquest eix. És la primera operació que es realitza donat que permet obtenir una dimensió de longitud del passador molt exacta. Alhora es realitzarà en una sola fase, com a operació d'acabat.

L'eina empleada serà la DIN 4980, també utilitzada per a cilindrar en direcció esquerra.

- b. **Xamfranat:** en aquesta operació, molt similar a la de refrentat i en la que es dona la mateixa distribució de moviments, degut a la geometria de l'eina, l'aproximació a la peça es fa directament sobre un dels cantons exteriors i mantenint un cert angle conegut. Així doncs, es genera una superfície inclinada (xamfrà) respecte de l'eix de gir de la peça que envolta tot el seu perímetre exterior. Així es dona el que es coneix com *matar el cantó viu* de la peça, eliminant el vèrtex afilat a causa de la rebava generada en el refrentat.

L'eina utilitzada serà la DIN 4972, l'exclusiva per a realitzar xamfranats en direcció a l'esquerra.

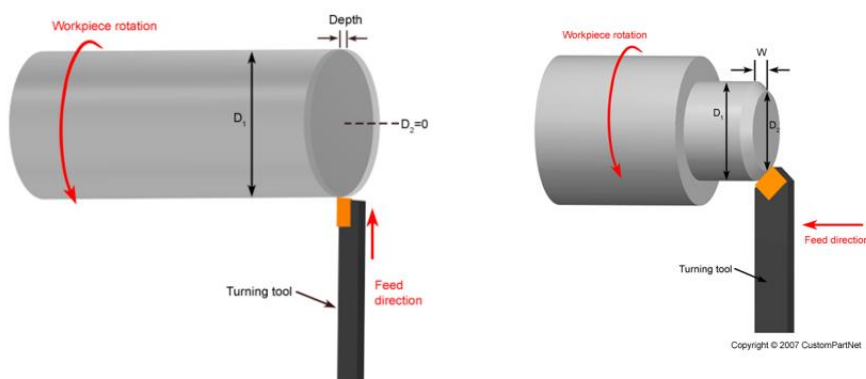


Fig. 17 Diagrama de refrentat (esque.) i xamfranat (dreta)

Ambdues operacions s'efectuaran per a cadascun dels dos extrems de cada segment tubular d'alumini generat a partir de l'operació de tallat amb serra anterior fins a obtenir un passador tubular. Les mesures d'aquesta peça venen determinades pel 4.3. *Plànols d'especejament*.

1.5.2.4. Trepanat

El trepanat és el tercer dels processos de mecanitzat per arrencament d'encenalls projectats. Aquest es basa en la fixació de la peça a treballar, que es trobarà immòbil, mentre se li aproxima una broca helicoidal, nom que rep l'eina de tall, que gira a una certa velocitat de tall i es desplaça amb un cert avanç fins assolir la profunditat del forat desitjada. En aquest cas, s'utilitzarà per a perforar els orificis perimetrals als tubs de PVC que conformen l'estructura general del braç de mesura en els segments entre articulacions.

La màquina eina per efectuar el trepanat és el trepant, i aquest acostuma a ser de peu en les centrals de fabricació industrials, amb o sense avanç automàtic. Tanmateix, l'operació de trepanat també es pot efectuar per mitjà de torns o fresadores, si escau. En aquest projecte, es preveu l'ús d'un trepant manual de peu, amb una sèrie de broques universals d'acer ràpid especial (HSS) regulades per la norma DIN 338. Aquestes broques acostumen a tenir una sèrie de canals d'evacuació d'encenalls helicoidals que s'estenen al llarg dels seus flancs de tall. Aquests mateixos canals provoquen que la rigidesa de l'eina es vegi disminuïda, fent-la susceptible a la flexió en aplicar-hi un esforç per generar avanç envers el material. Això acaba provocant que les toleràncies dimensionals d'aquest mètode siguin poc precises. Així doncs, per a una major precisió en el foradat, sobretot tenint en compte que s'efectuaran sobre una superfície corba (tubular), es recomana l'ús de broques de puntejar (DIN 333); es tracta de broques de menor diàmetre i longitud que generen una indentació en el punt del material en el que es vol perforar posteriorment.



Fig. 18 Procés de trepanat

Si es volen assolir toleràncies inferiors, es pot complimentar l'ús de broques helicoidals amb broques mandrils i broques escairadores, en ordre ascendent de qualitat de tolerància assolida i, per tant, d'aplicació. Tanmateix, donat que la importància dels orificis projectats en el BAMC no recau en les dimensions sinó en la seva posició relativa, només es farà ús de les broques helicoidals amb els corresponents diàmetres.

1.6. Estudi de materials

Durant les etapes inicials d'enginyeria d'estratègia que s'han anat succeint no s'ha entrat en detalls tècnics ni en particularitats del disseny del braç articulat de mesura que esdevé l'objecte d'estudi central de la present memòria. Tanmateix, arribats a aquest punt, resulta convenient fer-se una idea de les possibilitats envers materials constructius disponibles; l'aspecte material anirà estretament relacionat i condicionarà, en gran mesura, altres camps del desenvolupament i la gestió del projecte. Sobretot en les etapes posteriors d'enginyeria de concepte, detall i d'execució, on s'exposarà

minuciosament el procés de disseny i es gestionarà la fabricació d'un prototip funcional de BAMC, la prèvia elecció dels materials de treball adients facilitarà molt la tasca de l'enginyer. Cal tenir en compte que, la dimensió material d'un objecte qualsevol, a banda d'aportar les propietats constructives amb les que comptarà aquest, determinant-ne el seu comportament, influirà substancialment en els processos de fabricació i muntatge i, de forma homòloga, en el procés de disseny.

Per altra banda, ja s'ha determinat que el principal procés de fabricació implicat en aquest projecte serà la impressió tridimensional o modelat per deposició fosa (FDM). Per tant, les directrius envers l'elecció de materials constructius esdevenen, en part, acotades. En qualsevol cas, la selecció seguirà la següent metodologia, amb tres fases diferenciades [8]:

1. Identificació de requeriments i condicionants

La primera fase consistirà en l'anàlisi i la identificació de les propietats indispensables que hauran de recollir els diferents materials per la seva aplicació específica en base als requeriments del disseny projectat. Així doncs, es partirà d'una sèrie d'especificacions que es traduiran en forma de propietats materials qualificables i quantificables per a cadascun dels components funcionals contemplats en el disseny.

A banda de dels requeriments del disseny, hi ha una sèrie de factors de menor necessitat que també influiran en la selecció d'un material específic per a cada aplicació, en major o menor mesura. Cal identificar degudament aquests condicionants per tenir-los en compte.

2. Ús de base de dades (Ansys GRANTA EduPack)

Un cop s'han considerat quines són les propietats fonamentals que ha de complir cada material, es passarà a executar una base de dades informatitzada per agilitzar el procés de revisió, comparació i selecció de materials; es tracta del programari *Ansys GRANTA EduPack*, la versió més actualitzada del *CES EduPack*, un software que reuneix multitud de recursos d'ensenyament que donen suport a l'educació en l'àmbit dels materials als plans d'estudi d'enginyeria, disseny, ciència i desenvolupament sostenible. Actualment el fan servir més de 1400 universitats, escoles i facultats de tot el món. En el seu nivell més avançat, compta amb una biblioteca de més de 3900 materials, incloent les seves propietats i particularitats físico-químiques així com els processos de fabricació als que es poden sotmetre. Aquesta eina ajudarà a l'autor a discernir entre la gran varietat material possible per iniciar la selecció.

3. Selecció final del material

Finalment, una vegada acabada la selecció dels materials mitjançant el software, es passarà a analitzar les solucions proposades (si n'hi ha més d'una) i a l'elecció de la ideal en cada cas. Tanmateix, la decisió última en cas de falta d'especificitat recaurà sempre en la figura del projectista; per a fer-ho, es tindran en compte aspectes com els econòmics o els mediambientals, d'entre altres criteris no directament relacionats amb les propietats físiques o químiques del material. Igualment, es consideraran altres paràmetres la quantificació dels quals resulta especialment difícil; conceptes com l'accessibilitat o la sostenibilitat, en totes les dimensions que puguin englobar, entren en joc en aquest punt.

1.6.1. Requeriments i condicionants del disseny

El desenvolupament complet i detallat del procediment de disseny del braç articulat de mesura es recull a partir del pròxim apartat (2. *Disseny del braç articulat de mesura*). Tanmateix, en aquest

punt de la memòria s'esmenten resumidament les necessitats materials més destacables del disseny. Això servirà per a dirigir i acotar la selecció dels materials que més tard s'aplicaran en la fabricació del prototip funcional. Per a fer-ho, s'establirà una magnitud determinada i se'n quantificarà un valor (o un interval) en les unitats corresponents. Alhora, aquestes sol·licitacions es classificaran en funció del camp constructiu (grup funcional del BAMC) del que provenen, diferenciant-se l'estructura general dels components mecànics i dels passadors i eixos.

1.6.1.1. Estructura general

Per a l'estructura general del braç, el gruix constructiu del cos, es busca un material comercialitzat ja en format tubular que simplifiqui els procediments de fabricació tot assegurant la conformació d'una estructura estable, ferma i de massa reduïda. Aquest ha de reunir les propietats recollides a continuació:

a. Baixa densitat: el còmput global dels elements estructurals i funcionals del BAMC han de presentar una relació massa – volum el més reduïda possible a fi d'alleugerir el pes propi dels mateixos. Això tindrà implicacions dinamitzadores en els esforços suportats per aquests, i reductores en el seu dimensionament, per tant. Alhora també resultarà beneficiós envers la interacció entre l'aparell i l'usuari en termes de requerir de menys esforços per part d'aquest últim per a situar el braç a l'hora d'efectuar una mesura.

La densitat (ρ) es fixarà en un interval comprès entre $0,9$ i $3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

b. Rigidesa: l'estabilitat en el moment de la mesura és un factor primordial per assolir resultats precisos i reproduïbles. Així doncs, l'estructura del braç ha d'esdevenir un esquelet la deformitat del qual sigui gairebé inapreciable envers els esforços implícits en la seva utilització. Tanmateix, no convé que sigui un material especialment fràgil, ha de disposar de certa ductilitat i/o tenacitat. La rigidesa, o el seu paràmetre antagònic, la ductilitat, es mesuren per mitjà del mòdul elàstic, també conegut com mòdul de Young (E). Aquest s'acotarà entre $1\cdot 10^3$ i $4\cdot 10^3$ MPa.

c. Resistència mecànica: donat que en la propietat *a. Baixa densitat* s'exigeix una densitat moderada del material, aquest punt es refereix a una resistència mecànica específica (relació resistència mecànica-densitat) elevada. És a dir, el material ha de disposar d'una capacitat elevada de resistir tensions en relació a la seva massa, o a la seva densitat. Les tensions vindran provocades per l'aplicació d'esforços dinàmics i estàtics durant el procés de mesura, i aniran amplificades pels llargs segments que formen el BAMC entre les seves articulacions.

La resistència mecànica absoluta a tracció (σ_R), sense tenir en compte la densitat, es fixarà entre 10 i 70 MPa.

d. Propietats tèrmiques: donat que el braç de mesura ha de poder operar en un interval de temperatures ambientals relativament ampli (0°C - 50°C), l'estructura que el forma ha de veure's poc afectat en termes de les seves propietats mecàniques i químiques (estructura atòmica) en tot aquest ventall tèrmic. Així doncs, no ha d'experimentar grans dilatacions o contraccions (estabilitat tèrmica) i ha d'actuar, en certa manera, com un aïllant.

Aquest comportament es definirà per mitjà d'un coeficient d'expansió tèrmica situat entre $50\cdot 10^{-6}$ i $100\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ i una conductivitat tèrmica d'entre $0,1$ i $0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Alhora, es fixaran les temperatures màximes i mínimes d'utilització en l'interval imposat anteriorment.

- e. **Opacitat:** donat que a l'interior de l'estructura han de passar un seguit de cables que connecten i comuniquen els components electrònics entre sí, per una qüestió purament estètica, es necessita un material que sigui opac, és a dir, que no deixi passar la llum a través seu.
- f. **Disponibilitat comercial:** en aquest cas, s'entén l'accessibilitat com a sinònim de facilitat de proveïment, és a dir, el material seleccionat ha de poder obtenir-se comercialment de forma fàcil i assequible. La seva disponibilitat no ha de dependre de la producció o l'estoc de tercers a fi de simplificar el procés d'abastiment i fabricació, tot reduint temps i costos de producció. Aquests aspectes es tracten de forma més detallada en l'apartat 5. *Plec de Condicions*.
- g. **Reciclatge:** el material seleccionat ha de ser reciclable o, en substitució, comptar amb un procés d'obtenció de la matèria prima d'origen amb un baix impacte ecològic. Cal tenir en compte que la sostenibilitat en un material és un paràmetre difícilment quantificable.
- h. **Format tubular:** el material ha de comercialitzar-se en format tubular directament, per evitar afegir un procés de fabricació extra a la totalitat dels ja projectats. La forma tubular pot ser prismàtica quadrangular, circular o qualsevol altra geometria que esdevingui convenient. Cal respectar el fet que l'element material elegit sigui buit i de gruix de paret suficient com per suportar les sol·licitacions aplicades; això últim està estretament relacionat amb les propietats mecàniques anteriorment avaluades.

1.6.1.2. Components mecànics i estructurals

Pel que fa als components mecànics mòbils, la part funcional que permetrà el mesurament de diferents punts per mitjà del moviment del braç articulat, ja s'ha clarificat que es fabricaran per mitjà del modelat per deposició fosa (impressió tridimensional). Així doncs, el mitjà material que els formi haurà de trobar-se d'entre les opcions presents en el mercat reservades a aquesta tecnologia. Alhora, haurà de disposar de les següents característiques:

- a. **Baixa densitat:** *ídem*. propietat a. *Baixa densitat* de l'apartat 1.6.1.1. *Estructura general*.
- b. **Rigidesa:** *ídem*. propietat b. *Rigidesa* de l'apartat 1.6.1.1. *Estructura general*.
- c. **Resistència mecànica:** *ídem*. propietat c. *Resistència mecànica* de l'apartat 1.6.1.1. *Estructura general*.
- d. **Resistència al desgast:** entre les peces i elements projectats en el disseny del BAMC es preveu moviment relatiu i contacte directe, el que causa l'aparició de friccions i abrasió entre components. Així doncs, el desgast sofert per aquests ha de ser el mínim possible per evitar afectacions negatives en el funcionament de l'aparell tals la com pèrdua de precisió per modificació de cotes funcionals (aparició de jocs i pèrdua d'ajusts). Aquest paràmetre va estretament relacionat amb la duresa superficial. No s'ha quantificat cap variable concreta per introduir aquest paràmetre en el procés de selecció, però es tindrà en compte a l'hora de la selecció final del material.
- e. **Disponibilitat comercial:** *ídem*. propietat e. *Accessibilitat comercial* de l'apartat 1.6.1.1. *Estructura general*.

- f. **Reciclatge:** *ídem.* propietat g. *Reciclatge* de l'apartat 1.6.1.1. *Estructura general*.
- g. **Format filament:** donat que el procés de fabricació seleccionat és el modelatge per deposició fosa, tal i com es recull en l'apartat 5. *Plec de Condicions*, pel tipus d'impresora seleccionat es requereix del material el format de filament bobinat. Aquesta característica implica, necessàriament, que el material seleccionat sigui dúctil, sobretot sota condicions tèrmiques determinades. Així doncs, ha de poder suportar deformacions plàstiques notables sense trencar-se sotmès a una temperatura relativament elevada.
- h. **Punt de fusió baix:** donat que el procés de fabricació seleccionat és el modelatge per deposició fosa, tal i com es recull en l'apartat 7. *Plec de Condicions*, pel tipus d'impresora seleccionat, es requereix que la temperatura de fusió del material es trobi per sota dels 250°C.

1.6.1.3. Passadors i eixos

Aquest grup de components és el més reduït del muntatge projectat, però permet la transmissió de parell i moviment a través de les articulacions cicloïdals tot mantenint unida l'estructura funcional del BAMC. Així doncs, la seva rellevància és evident. Aquests elements han de presentar les següents propietats:

- a. **Baixa densitat:** *ídem.* propietat a. *Baixa densitat* de l'apartat 1.6.1.1. *Estructura general*. Ara la densitat (ρ) s'acotarà entre 2 i 4 g·cm⁻³.
- b. **Rigidesa:** *ídem.* propietat b. *Rigidesa* de l'apartat 1.6.1.1. *Estructura general*. Per a aquesta selecció el mòdul d'elasticitat (E) es situarà entre 50 i 100 MPa.
- c. **Resistència mecànica:** *ídem.* propietat c. *Resistència mecànica* de l'apartat 7.1.1. *Components mecànics*. En aquest cas, la resistència mecànica (σ_R) es definirà per sota dels 100 MPa.
- d. **Resistència al desgast:** *ídem.* propietat d. *Resistència al desgast* de l'apartat 1.6.1.2. *Estructura general*.
- e. **Compatibilitat:** el material que conformi els passadors i eixos prevists en el disseny del braç de mesura ha de ser compatible amb el material elegit per a formar el cos dels elements mecànics funcionals. No ha d'existir cap mena d'interacció química entre ells que pugui causar efectes tals com corrosió, desgast, excés de fricció, adherència, etc.
- i. **Disponibilitat comercial:** *ídem.* propietat e. *Disponibilitat comercial* de l'apartat 1.6.1.1. *Estructura general*.
- j. **Reciclatge:** *ídem.* propietat g. *Reciclatge* de l'apartat 1.6.1.1. *Estructura general*.
- k. **Format tubular:** *ídem.* propietat g. *Format tubular* de l'apartat 1.6.1.1. *Estructura general*.

1.6.2. Ansys GRANTA EduPack

Un cop recollides i quantificades les propietats materials que requereix el disseny del braç articulat de mesura, es pot passar a la implementació del software *Ansys GRANTA EduPack*. A través d'aquest programari, es generarà una comparació exhaustiva entre una multitud de diferents materials a partir de la base de dades de la que disposa. Introduint els paràmetres quantificats en l'apartat anterior, per a cadascuna de les tres agrupacions de peces definides, s'obindrà un resultat gràfic envers la conveniència de les diferents famílies de materials existents. A partir d'aquesta tria inicial i d'entre les possibles opcions, es discernirà un sol material específic per a cada aplicació.

1.6.2.1. Estructural general

Donat que per a l'estructura general no es té cap criteri inicial específic de diferenciació, s'ha optat per partir de la relació densitat – elasticitat (mòdul de Young) per ordenar gràficament les diferents famílies de materials disponibles.

Un cop introduïdes la resta de propietats acotades en funció de l'apartat 1.6.1. *Requeriments i condicionants del disseny*, es genera un filtratge generalitzat, quedant com a grup òptim el format per alguns polímers termoplàstics sintètics (plàstics).

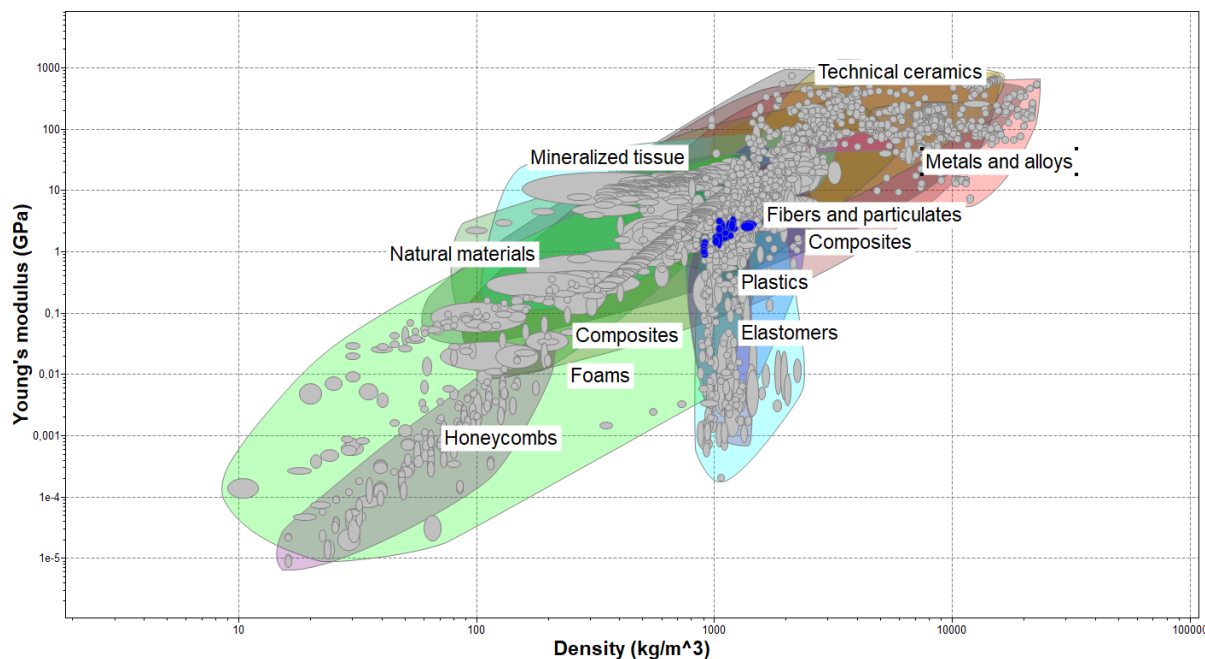


Fig. 19 Classificació gràfica de materials segons la relació densitat - elasticitat extretra del GRANTA EduPack

La decisió final en la que el policlorur de vinil (PVC) ha esdevingut el material elegit s'ha pres en base a la disponibilitat comercial, el preu i el format tubular, paràmetres en els que el PVC destaca notablement per sobre de la resta de polímers.

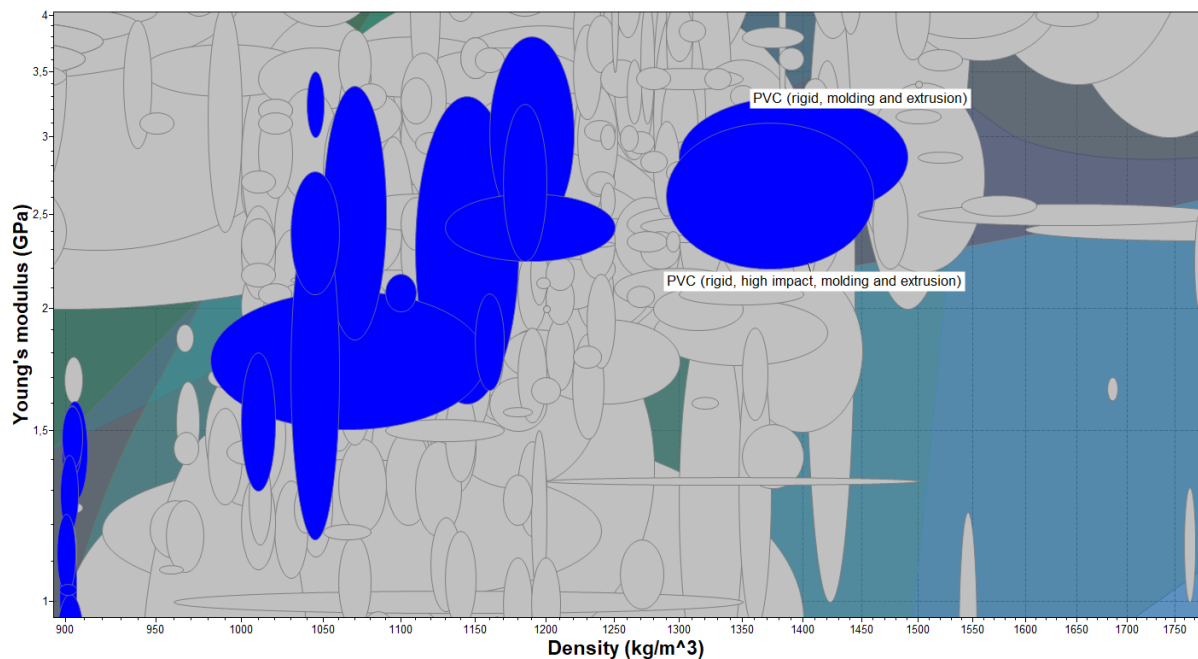


Fig. 20 Posició concreta del PVC en la gràfica anterior

1.6.2.2. Components mecànics

En el cas dels components mecànics, ja es preveu que el procés de fabricació utilitzat és la impressió 3D per FDM. Això ja obliga a començar la selecció havent descartat multitud de materials. De fet, la tria parteix tenint només en compte el subgrup dels polímers termoplàstics; aquesta és l'única família de materials capaç de ser processada mitjançant l'aplicació de calor sense experimentar degradació. Igualment, s'ha iniciat la selecció mitjançant una ordenació gràfica a partir de la relació densitat – elasticitat (mòdul de Young).

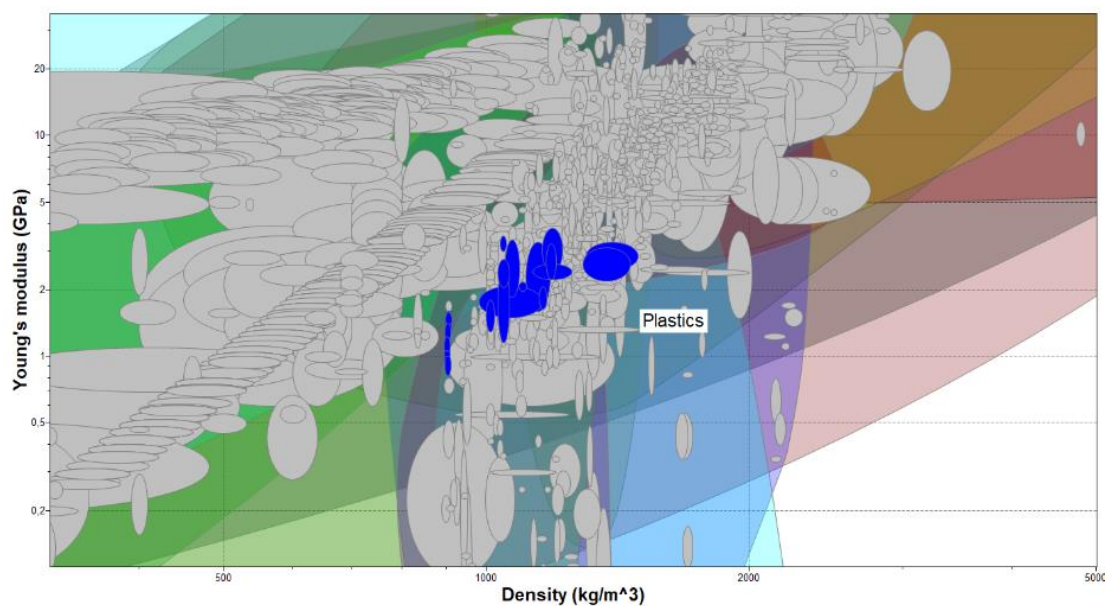


Fig. 21 Posició dels plàstics en la gràfica densitat - elasticitat

En introduir la resta de paràmetres quantificats en l'apartat anterior, el ventall de possibles materials s'ha reduït de forma notable.

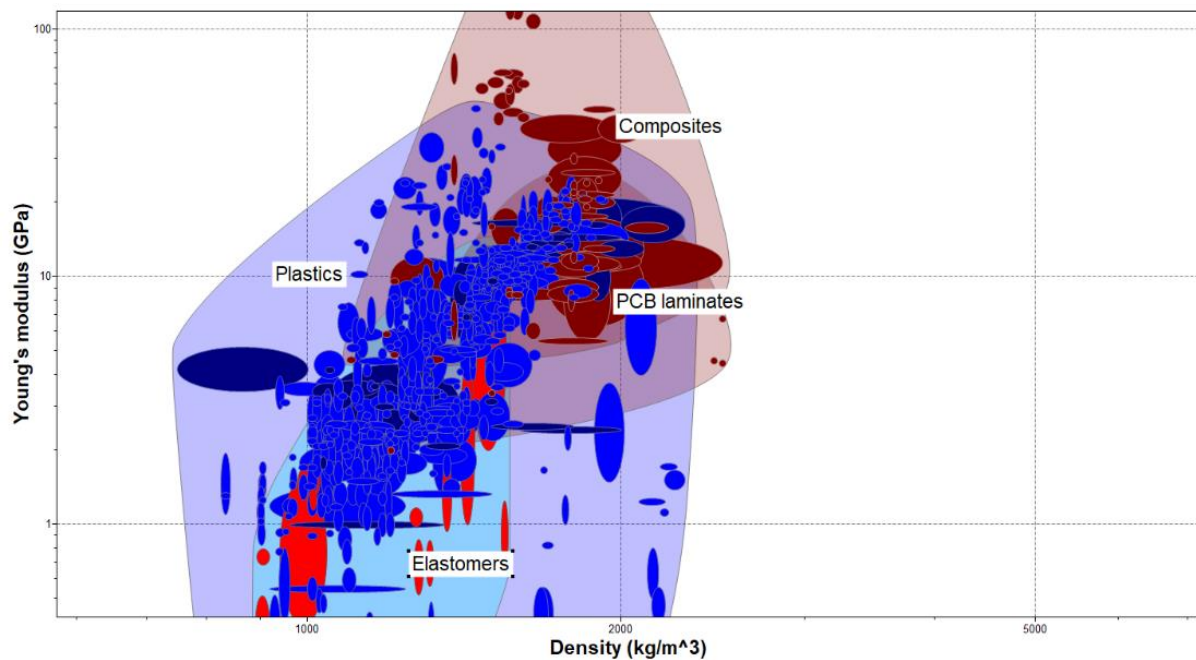


Fig. 22 Posicionament de les diferents classes de polímers entorn les propietats avaluades

Les propietats tèrmiques en relació a un punt de fusió baix, contraposades a una bona resistència mecànica i a la possibilitat del reciclatge (biodegradació), han situat l'àcid polilàctic (PLA) com a clar candidat a ser la base material dels components mecànics del BAMC. Tanmateix, s'ha seleccionant enfront la resta d'opcions per la seva habitual utilització en la impressió 3D, el que implica una disponibilitat comercial en format filament alta sota uns preus molt competitiu.

1.6.2.3. Passadors i eixos

Per a la selecció del material destinat a la construcció dels passadors no es parteix de cap criteri inicial determinant. Si més no, es sap que les propietats mecàniques han de ser superiors a les dels materials seleccionats anteriorment. Igualment, es partirà de l'ordenació gràfica per mitjà de la relació densitat – elasticitat (mòdul de Young).

Aquest primer filtre no defineix molt concretament en quina família de materials cal centrar l'atenció. Si més no, en aplicar la resta de criteris i intervals envers les propietats recollides en 1.6.1. *Requeriments i condicionants del disseny*, el cercle es tanca sobre el subgrup dels aliatges lleuger, i més concretament, dels aliatges en base alumini.

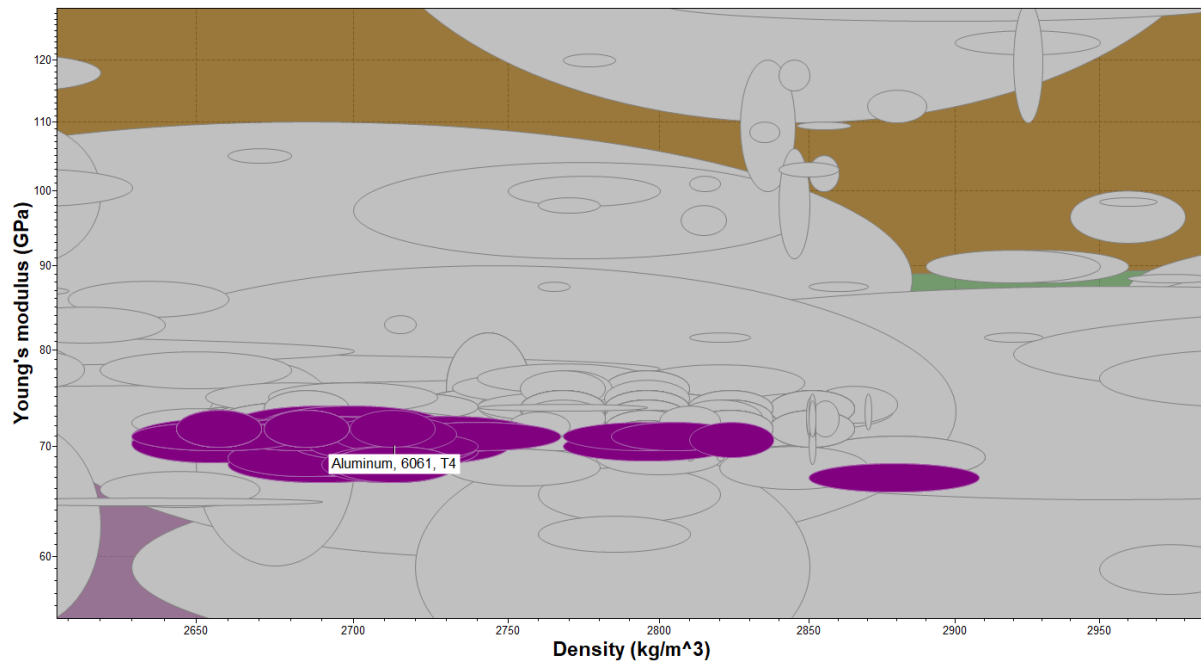


Fig. 23 Posició de l'alumini en la gràfica densitat - elasticitat

D'entre la diversitat de dissolucions sòlides metàl·liques presents al mercat, una de les més recurrents a l'hora d'aplicar processos d'extrusió per obtenir el material en format tubular és l'alumini 6061-T4. El seu preu comercial resulta coherent i presenta un tractament tèrmic d'enduriment, que en millora substancialment la resistència a l'abradió. Per aquests motius, s'ha elegit com a material constructiu per als passadors i eixos de l'articulació cicloidal projectada en el BAMC.

1.6.3. Selecció final de materials

Seleccionats els tres materials principals que s'utilitzaran per a construir el prototip funcional de BAMC, es pot fer un incís per analitzar amb major deteniment les propietats físiques, químiques i comercials d'aquests. A banda dels criteris de selecció, el coneixement d'aquestes característiques ajudarà a entendre tant l'elecció feta com les consideracions que cal tenir presents durant el disseny i els processos inclosos en la posterior fabricació.

Cal esmentar que la major part de les propietats aquí exposades, excloent les característiques purament comercials, han estat extretes de la pròpia base de dades del programari *Ansys GRANTA EduPack*.

1.6.3.1. Estructura general (PVC)

L'estructura general es fabricarà en la seva totalitat en PVC, un dels materials polimèrics d'ús general més emprats i versàtils, i un dels materials plàstics més comercialitzats arreu del planeta. Això provoca que es pugui trobar en una infinitat de punts de venda, a un baix cost i en multitud de formes. Concretament, per al projecte s'ha elegit un format tubular de diàmetre exterior igual a 32 mm, i un diàmetre interior de 28,4 mm, fabricat per la marca comercial *JSL*.

D'entre els hidrocarburs derivats del petroli, el PVC està catalogat com a plàstic termoplàstic. Es tracta d'un homopolímer format a partir de la polimerització de monòmers de clorur de vinil

$((C_2H_3Cl)_n)$ generant-se grans molècules on hi predomina l'enllaç covalent. Envers la seva estructura química, els grans àtoms de clor (Cl) que s'enllacen a un de cada dos àtoms de carboni (C) li aporten característiques amorfes. Un polímer amorf és aquell l'estructura macromolecular majoritària del qual no segueix un patró d'ordenació específic i compacte (cristal·linitat) dotant al material de més tenacitat, menor densitat, transparència, etc. Això n'impedeix la seva cristal·lització i aporta una alta cohesió entre molècules i cadenes polimèriques per mitjà d'enllaços químics secundaris. Aquestes es deuen principalment als moments dipolars forts originats pels àtoms de clor, els quals alhora donen cert impediment estèric; és a dir, repel·leixen molècules amb la mateixa càrrega, creant repulsions electrostàtiques que redueixen la flexibilitat de les cadenes polimèriques. Aquesta rigidesa o dificultat en la conformació estructural fa necessària la incorporació d'additius per a processar-lo i obtenir el producte final desitjat. Aquests elements afegits poden ser plastificants, estabilitzadors tèrmics, lubricants o pigments, així com productes de farciment, per abaratir el producte. La naturalesa amorfa d'aquest polímer permet fàcilment la incorporació d'aquests additius. Val la pena assenyalar que les propietats mecàniques del PVC poden variar segons la formulació específica, les condicions d'obtenció i processament i la seva composició química.

A causa de la presència d'àtoms voluminosos (Cl) en la seva estructura molecular, el PVC presenta una densitat baixa, situada entre 1,2 i 1,4 g·cm⁻³. Alhora és un material químicament estable, inert i biocompatible, pel que s'empra extensivament en aplicacions sanitàries i higièniques (en catèters, bosses per a sang i instal·lacions d'aigua potable, per exemple). Així doncs, presenta certa resistència química, és a dir, és resistent a molts productes químics, inclosos àcids, àlcalis, olis i greixos; tampoc permet la penetració de l'aigua i no es veu afectat per la corrosió

És un material altament resistent i durador, amb una vida útil estimada de l'ordre de les desenes d'anys. Suporta bé l'exposició continuada a llum UV solar i les condicions atmosfèriques pròpies de la intempèrie.

Mecànicament, en la majoria de formes comercials en les que es troba, presenta una bona resistència a la tracció, amb un valor que oscil·len entre 40 i 70 MPa, i una bona resistència a la flexió, acotada entre 60 i 80 MPa. Envers el mòdul elàstic o de Young, aquest és relativament baix i normalment oscil·la entre 1500 MPa i 3000 MPa. Tanmateix, disposa d'una bona resistència a la fatiga i evidencia una bona estabilitat dimensional. Contràriament, la resistència a l'impacte és relativament baixa en comparació amb altres plàstics, però es pot millorar afegint modificadors d'impacte o plastificants a la formulació.

Superficialment presenta una elevada resistència a l'abració, el que està directament relacionat amb la duresa; el PVC té una duresa relativament alta que oscil·la entre 70 i 100 Shore A.

La presència dels àtoms de clor (Cl), també provoca que no cremi amb facilitat ni per si sol, cessant la combustió una vegada la font de calor s'ha exhaurit; alhora és un mal conductor tèrmic (0,16 a 0,22 W·(m·K)⁻¹). Això el fa un candidat òptim per aplicacions en recobriments, aïllaments i tancaments d'accessos en el camp de l'edificació. Igualment, s'empra per aïllar i protegir elèctricament instal·lacions i components pel fet que és un bon aïllant elèctric (elevada rigidesa dielèctrica). Tanmateix, torna flexible i emmotllable (deformable) sense necessitat de sotmetre'l a altes temperatures i manté la forma i les propietats donades una vegada ha refredat. La seva temperatura de deflexió tèrmica es situa entre els 135 i els 180°C, mentre que la temperatura de transició vítria oscil·la entre els 75 i els 100°C. Tot i que aquestes temperatures semblen baixes, el PVC disposa d'una molt bona estabilitat dimensional tèrmica, amb temperatures d'ús continu de fins a 70°C, i un coeficient d'expansió tèrmica de l'ordre dels 10⁻⁶ K⁻¹.

Aquest comportament tèrmic propi d'un termoplàstic, provoca que no es degradi amb el calor (per sota de 200°, on es situa la temperatura de degradació) i que, per tant, sigui reciclable. Així doncs,

dintre de l'impacte contaminant i residual derivat de l'obtenció i el processat dels polímers, el PVC esdevé un material substancialment més sostenible, amb una inferior petjada ecològica.

Aquestes característiques fan que sigui un material fàcil de processar per extrusió, modelat o mecanitzat. Alhora, el fet que la seva formulació i processament siguin tan variats genera una versatilitat d'aplicacions molt gran.

Finalment, esdevé un polímer molt rendible; econòmicament és, si més no, el plàstic més econòmic del mercat, amb un preu situat entre els 0,946€/kg i els 1,07€/kg.

A banda de les propietats generals tractades, en la següent taula (*Taula 5*) es recullen les característiques específiques del PVC utilitzat en el present projecte proporcionades pel fabricant:

Propietats generals	Denominació	Policlorur de vinil (PVC)
	Tipus de material	Polímer
	Classificació	Homopolímer, sintètic (plàstic), termoplàstic
	Densitat	1,4 g·cm ⁻³
	Reciclatge	Sí, per fusió
Dades comercials	Fabricant	<i>JSL Material Eléctrico</i>
	Format	Tubular
	Model (referència)	VD32 (4321)
	Mides	∅ _{ext} 32 mm, ∅ _{int} 28,4 mm, L2,4 m
	Color	Gris
	Preu	1,2 €/m
Propietats químiques	Components principals	C, H, Cl
	Fórmula química	(C ₂ H ₃ Cl) _n (hidrocarbur)
	Tipus d'enllaç majoritari	Covalent
	Organització atòmica	Molecular linear, amorf
Propietats mecàniques	Mòdul de Young (<i>E</i>)	3200 MPa
	Resistència a tracció (σ_{Rm})	50 MPa
	Deformació abans de ruptura (ϵ)	15%
	Coefi. de Poisson (ν)	0,38
	Resistència a flexió	75 MPa
	Resistència a l'impacte – Charpy	4,0 kJ·m ⁻²
	Duresa (<i>Shore</i>)	75 Shore D
Propietats tèrmiques	T ^a fusió (<i>T_m</i>)	110°C
	T ^a transició vítria (<i>T_g</i>)	76°C
	T ^a degradació (<i>T_d</i>)	200°C
	Calor específic	0,9 kJ·(kg·K) ⁻¹
	Coefi. tèrmic d'expansió	8,5 μm·(m·K) ⁻¹
	Conductivitat tèrmica	0,2 W·(m·K) ⁻¹
	T ^a màxima d'utilització	60°C
	T ^a mínima d'utilització	-5°C

Taula 5. Propietats del PVC comercial [8]

1.6.3.2. Components mecànics (PLA)

Per a la totalitat dels components mecànics que conformen les parts funcionals i mòbils del BAMC, fabricats per modelat per deposició fosa (impresió 3D), s'utilitzarà el PLA en format de filament. El PLA és un polímer termoplàstic d'origen natural (bioplàstic), obtingut a partir del midó cultius com la canya de sucre, la mandioca o el blat. Concretament s'utilitzarà en bobines d'1 kg de massa (325 m aproximadament) i diàmetre d'1,75 mm (amb una precisió dimensional de $\pm 0,02$ mm), de la companyia *SUNLU*.

Constituït per polimerització amb enllaços covalents d'elements similars a l'àcid làctic, per obertura dels anells lactides, compta amb propietats semblants a les del tereftalat de polietilè (PET) molt utilitzat per fer envasos. Contràriament però, el PLA és biodegradable sota certes condicions tèrmiques (l'ordre de 60°C). També es pot degradar per mitjà d'aigua (H_2O) i/o diòxid de carboni (CO_2). Actualment el seu ús està molt estès en sectors com el de l'alimentació per a l'elaboració de *packaging* (embalatges) o similars, per a través de la injecció per motlle. Les seves característiques permeten obtenir grans quantitats de peces iguals abaratint enormement els costos de producció; tanmateix, el seu caràcter biodegradable esdevé un punt molt atractiu. Tot i que els motlles d'injecció presenten una gran capacitat de producció per a altes demandes i producció en sèrie, el PLA s'utilitza principalment en la impressió 3D en el procés anomenat modelat per deposició fosa. De fet, és un dels principals materials utilitzats per aquesta tecnologia de fabricació.

Donat que prové de productes derivats de cultius agrícoles, esdevé un material obtingut a partir d'una font renovable, altament sostenible i amb un impacte mediambiental (petjada, emissions d'efecte hivernacle, etc.) reduïdes en comparació a altres polímers que deriven de subproductes petrolífers. Igualment, degut al seu origen natural, presenta una baixa toxicitat i és segur per al seu ús en aplicacions alimentàries i mèdiques.

Mecànicament, el PLA presenta unes propietats força destacables en relació a la seva densitat, situada entorn els $1,24$ i els $1,32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; la resistència a tracció del PLA oscil·la entre 50 i 70 MPa , i el mòdul de Young o constant d'elasticitat entorn els 3000 MPa ; la resistència a la flexió pot variar entre 70 i 100 MPa i la resistència a l'impacte és relativament baixa, entre 10 i $20 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Així i tot, el PLA satisfà la necessitat d'un ràtio resistència – densitat elevat.

Malauradament, la duresa superficial del PLA destaca poc o gens en comparació amb altres termoplàstics, amb un rang d'entre 70 i 85 Shore D .

A causa de la seva estructura molecular amorfa, el PLA té una bona claredat òptica, el que el fa ideal per a aplicacions on es requereix transparència. Tanmateix, s'acostuma a comercialitzar pigmentat. Aquesta mateixa naturalesa d'ordenament molecular no cristal·lina té implicacions envers les propietats tèrmiques; aquest biopolímer té un punt de fusió relativament baix en comparació amb altres termoplàstics (al voltant dels 145°C), cosa que facilita la fusió i el modelat. La temperatura de transició vítria és de 60°C i la de deformació es troba entorn els 55°C . Aquest fet possibilita que s'utilitzi recurrentment en impressió 3D, però en limita la tolerància i la utilitat sota condicions tèrmiques elevades (o baixes) com a aïllant, tot i que la seva conductivitat tèrmica és baixa.

Presenta certa susceptibilitat a la pèrdua de propietats degut a la humitat; el PLA és higroscòpic i pot absorbir l'aigua en estat vapor de l'ambient, el que afecta les seves propietats mecàniques fent-lo més fràgil.

És important tenir en compte que aquestes propietats es poden millorar utilitzant additius, barrejant-los amb altres polímers o modificant les condicions de processament. Alhora, envers la tecnologia de modelat per deposició fosa projectada, cal saber que les propietats mecàniques de les peces resultants es poden veure afectades per paràmetres de processament com ara la temperatura

d'impressió, la velocitat de refredament i les condicions de recuit. Per tant, és necessari optimitzar les condicions d'impressió per obtenir les propietats mecàniques desitjades per a aplicacions específiques com la projectada. Tot aquest procés de regulació es recull en l'apartat 5. *Plec de Condicions*. Tanmateix, el PLA és, precisament, dels materials que toleren una major marge d'error en el procés de fabricació per FDM; és a dir, és un material amb el que es poden obtenir resultats d'impressió òptims sense haver de controlar excessivament l'ambient i els paràmetres d'impressió. Finalment, el seu origen biodegradable i el seu ús com a material d'impressió provoca que es trobi d'entre els polímers més costosos econòmicament, amb un preu que varia entre 20 i 50 €/kg. No obstant això, el preu també pot variar depenent dels costos de producció dels fabricants, la demanda del mercat i altres factors externs.

A banda de les propietats generals tractades, en la següent taula (*Taula 6*) es recullen les característiques específiques del PLA utilitzat en el present projecte proporcionades pel fabricant:

Dades generals	Denominació	Àcid polilàctic (PLA)
	Tipus de material	Polímer
	Classificació	Homopolímer, natural (biopolímer), termoplàstic
	Densitat	1,24 g·cm ⁻³
	Reciclatge	Sí, per degradació i fusió
Dades comercials	Fabricant	SUNLU filament
	Format	Filament (bobina)
	Model (referència)	PLA PLUS 3D
	Mides	Ø1,75±0,02 mm, 1 kg (325 m aprox.)
	Color	Gris
	Preu	20,39 €/kg
Propietats químiques	Components principals	C, H, O
	Fórmula química	(C ₃ H ₄ O ₂) _n (hidrocarbur)
	Tipus d'enllaç majoritari	Covalent
	Organització atòmica	Molecular ramificat, amorf
Propietats mecàniques	Mòdul de Young (<i>E</i>)	2346,5 MPa
	Resistència a tracció (σ_{Rm})	49,5 MPa
	Deformació abans de ruptura (ϵ)	5,2 %
	Coefi. de Poisson (ν)	0,4
	Resistència a flexió	103 MPa
	Resistència a l'impacte – Charpy	15 kJ·m ⁻²
	Duresa (<i>Shore</i>)	83 Shore D
	Propietats tèrmiques	T ^a fusió (<i>T_m</i>)
T ^a transició vítria (<i>T_g</i>)	65°C	
T ^a degradació (<i>T_d</i>)	228°C	
Calor específic	1,3 kJ·(kg·K) ⁻¹	
Coefi. tèrmic d'expansió	7,5 µm·(m·K) ⁻¹	
Conductivitat tèrmica	0,13 W·(m·K) ⁻¹	
T ^a màxima d'utilització	55°C	
T ^a mínima d'utilització	-5°C	

Taula 6. Propietats del PLA [8]

1.6.3.4. Passadors (Al 6061 T4)

En el cas dels passadors, incorporats en el disseny de les articulacions cicloïdals projectades, el material seleccionat és l'alumini, el tercer element en abundància en l'escorça terrestre i amb multitud aplicacions industrials intrínseques a la quotidianitat humana. En la construcció del BAMC s'utilitzarà en forma de tub, amb un diàmetre exterior de 7,8 mm, i un interior de 5,6 mm, de la marca comercial *CQFD*, constituït per l'aliatge 6061 T4.

Un aliatge d'alumini és tracta d'una substància metàl·lica estructurada a nivell atòmic per cel·les cristal·lines de tipus cúbic centrat en les cares (CCC), amb 4 àtoms complets per cel·la unitària. Aquesta és la més deformable d'enter les existents. Per tant, l'alumini es pot treballar fàcilment per processos de mecanitzat per arrencament d'encenalls o de deformació plàstica. De fet, és el més deformable d'entre els aliatges lleugers no fèrrics. Alhora, aquesta estructura aporta unes propietats mecàniques molt destacables en relació a la seva densitat, ($2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) les quals poden millorar-se per mitjà de l'addició d'altres elements, formant aliatges, o amb tractaments tèrmics i superficials. La seva forma pura no s'utilitza molt més enllà del camp de la recerca i la investigació. En aquest cas, l'aliatge 6061 T4 incorpora magnesi (Mg), silici (Si) i coure (Cu) en proporcions variables; els tres elements possibiliten i incrementen la resistència mecànica per tractament tèrmic, entre altres implicacions. De fet, tal com indica el símbol *T4* inclòs en la nomenclatura, el material ha estat tractat per mitjà d'una posada en solució, un tremp i una maduració natural, a l'aire.

Mecànicament, i en general, els aliatges d'alumini solen tenir una resistència a la tracció entre 90 i 700 MPa, depenent de l'alumini específic i del tractament tèrmic aplicat, i un mòdul d'elasticitat d'aproximadament 70 GPa, que és gairebé un terç del mòdul d'elasticitat de l'acer.

Els aliatges d'alumini tenen solen mostrar allargaments a la ruptura d'entre el 10% i el 20%. La ductilitat varia del 2% al 30%, depenent de la categoria i la tempera de l'aliatge. Això permet que els aliatges d'alumini es puguin treballar fàcilment mitjançant processos de deformació plàstica com l'extrusió i el laminatge. En qualsevol cas, totes aquestes propietats mecàniques provoquen que la relació resistència – pes sigui molt superior a altres aliatges metàl·lics molt utilitzats en aplicacions estructurals i industrials, com l'esmentat acer.

Envers les propietats tèrmiques, l'alumini té una conductivitat tèrmica molt alta, al voltant de $237 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ a temperatura ambient, que és aproximadament tres vegades superior a del ferro. Aquesta alta conductivitat tèrmica fa que l'alumini sigui un bon conductor de calor i el fa útil per a aplicacions com ara radiadors, intercanviadors de calor i equips de refrigeració.

Per altra banda, compta amb un coeficient d'expansió tèrmica d'aproximadament $23,1 \mu\text{m}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ a temperatura ambient. Això significa que l'alumini es dilata en una proporció del 0,00231% per cada grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$) d'increment de temperatura. Aquesta propietat fa que l'alumini sigui útil per a aplicacions que requereixen una expansió tèrmica limitada (alta estabilitat dimensional), com ara en circuits electrònics i en aplicacions de metrologia de precisió, com la projectada en la present memòria. Alhora, tot i la seva facilitat per formar composts estables, l'alumini presenta una excel·lent resistència a la corrosió a causa de la ràpida formació d'una capa superficial d'òxid d'alumini (alúmina) de forma immediata, gairebé explosiva, en exposar-se al medi.

La capacitat calorífica específica de l'alumini es troba envers els $0,91 \text{ J}\cdot(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$, gairebé la meitat que la del ferro pur. Això proporciona una temperatura de fusió relativament baixa (660°C), que permet que sigui un material indicat per processos de fosa, injecció o emmotllament.

Tot i l'abundància en la que es troba, l'extracció de l'alumini i l'obtenció d'un format pur aprofitable resulten molt costoses des del punt de vista energètic. La seva afinitat química provoca que formi nombrosos compostos minerals estables, essent la bauxita el més habitual. La necessitat de

processos electrolítics de separació implica la utilització de grans quantitats d'energia elèctrica i d'aigua, i la generació de residus nocius per l'ambient, tot presentant un rendiment, en termes del ràtio material extret – alumini pur obtingut, molt baix. Aquestes afectacions mediambientals es contraresten, en part, pel fet que l'alumini esdevé reciclable gairebé de forma il·limitada per mitjà de processos de fundició.

Donada la seva rellevància, el preu mitjà de l'alumini varia constantment en funció de diversos factors, com ara la demanda del mercat, la situació econòmica global i els costos de producció, entre altres. En general, el preu de l'alumini es cotitza en dòlars per tona mètrica en els mercats de matèries primeres. Aquest valor, durant els últims anys, ha oscil·lat al voltant dels 1500 a 2500 \$·Tn, el que equival aproximadament a l'interval de 1,3 a 2,2 €/kg.

A banda de les propietats generals tractades, en la següent taula (*Taula 7*) es recullen les característiques específiques de l'alumini que s'utilitzarà en el projecte proporcionades pel fabricant:

Dades generals	Denominació	Alumini 6061-T4
	Tipus de material	Metà·lic
	Classificació	No fèrric, aliatge lleuger
	Densitat	2,7 g·cm ⁻³
	Reciclatge	Sí, per fusió
Dades comercials	Fabricant	CQFD
	Format	Tubular
	Model (referència)	69972
	Mides	∅ _{ext} 7,8 mm, ∅ _{int} 5,6 mm, L1 m
	Color	-
	Preu	1,89 €/m
Propietats químiques	Components principals	97,9% Al, 1% Mg, 0,6% Si, 0,28% Cu
	Fórmula química	Aliatge Al 6061 T4
	Tipus d'enllaç majoritari	Metà·lic
	Organització atòmica	Cel·les cristal·lines, CCC
Propietats mecàniques	Mòdul de Young (<i>E</i>)	68,9 GPa
	Resistència a tracció (σ_{Rm})	310 MPa
	Deformació abans de ruptura (ϵ)	16 %
	Coefi. de Poisson (ν)	0,33
	Resistència a flexió	276 MPa
	Resistència a l'impacte – Charpy	23 kJ·m ⁻²
	Duresa (<i>Brinell</i>)	95 HB
Propietats tèrmiques	T ^a fusió (<i>T_m</i>)	651°C
	T ^a transició vítria (<i>T_g</i>)	-
	T ^a degradació (<i>T_d</i>)	-
	Calor específic	0,89 kJ·(kg·K) ⁻¹
	Coefi. tèrmic d'expansió	23,6 μm·(m·K) ⁻¹
	Conductivitat tèrmica	167 W·(m·K) ⁻¹
	T ^a màxima d'utilització	-
	T ^a mínima d'utilització	-

Taula 7. Propietats de l'alumini [8]

1.6.3.5. Carcassa protectora del microcontrolador (TPU)

L'últim dels materials seleccionats va dirigit a la construcció de la carcassa exterior protectora del microcontrolador dissenyada per conformar el sistema d'acoblament d'aquest aparell de control del BAMC a la base del mateix. En aquest cas, la participació d'aquest material és molt puntual i només s'aplica a un component en tot el muntatge del BAMC. Alhora, la carcassa protectora no esdevé un element d'importància cabdal. Per aquest motiu, no s'ha realitzat l'estudi comú en la resta de materials i s'ha optat per una elecció directa i determinada pel procés de fabricació utilitzat.

Tal i com es veurà (2. *Disseny del braç articulat de mesura*), el disseny del sistema d'acoblament del microcontrolador es basa en les carcasses de protecció dels *smartphones* actuals. Amb això, s'ha optat per combinar una carcassa de protecció flexible que encapsula el microcontrolador i que s'uneix al cos del BAMC per mitjà d'un sistema de ranures. Sabent que el procés de fabricació disponible és el modelat per deposició fosa (FDM) per mitjà d'impresora tridimensional, el material comercial que més s'ajusta és el poliuretà termoplàstic (TPU) en format filament. Concretament s'utilitzarà en bobines d'0,5 kg de massa (300 m aproximadament) i diàmetre d'1,75 mm (amb una precisió dimensional de $\pm 0,02$ mm), produïdes per la mateixa empresa proveïdora del filament de PLA, la multinacional *SUNLU*.

Constituït per polimerització amb enllaços covalents entre poliols, isocianats i diols formant llargues cadenes lineals amb algunes reticulacions. Els poliols poden ser en base polièster o polièter en funció dels monòmers que els formen. En tot cas, els poliols de cadena lineal i llarga, així com els diols de cadena lineal i curta, reaccionen amb els diisocianats per formar un polímer semicristal·lí d'estructura lineal (per això és termoplàstic); la unió dels poliols als diisocianats componen la part amorfa (segment flexible), i la unió dels diols de cadena curta amb els diisocianats dona lloc a la part cristal·lina (segment rígid). Sent un polímer semicristal·lí, depenent del seu grau de cristal·lització pot mostrar-se des de molt transparent fins a completament opac. Serà transparent si és molt amorf i opac si el seu grau de cristal·lització és alt. Tant la formulació com el procés de polimeració i la posterior transformació durant la fabricació de les peces influeixen en el grau de cristal·linitat final i, per tant, en l'aspecte i en les propietats que presenta. Tanmateix, s'acostuma a comercialitzar pigmentat; en aquest projecte s'utilitzarà en coloració de color blanc.

Aquesta mateixa naturalesa d'ordenament molecular semicristal·lina té implicacions envers les propietats tèrmiques i mecàniques. Aquest polímer té un punt de fusió considerable en comparació amb altres termoplàstics (al voltant dels 225°C), així i tot, aquesta temperatura permet el modelat per impressió 3D. La temperatura de transició vítria inicial es troba als 60°C .

Per altra banda, presenta una capacitat tèrmica mitjana i una conductivitat baixa, amb valors d'entre 0,1 i 0,3 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, podent-se utilitzar en aplicacions d'aïllament de baixos requeriments. Igualment, la seva expansió tèrmica és força reduïda, mantenint-se estructuralment molt estable sota temperatures properes al seu punt de fusió.

Mecànicament, el TPU presenta unes propietats poc destacables en relació a la seva densitat, situada entorn els $1,21 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; la resistència a tracció del TPU ronda es troba entre 30 i 60 MPa en funció de la composició del material. Igualment, el mòdul d'elasticitat, que mesura la rigidesa del material, es troba entre 200 i els 800 MPa. En contrapartida, la resistència a la compressió acostuma a ser relativament alta, oscil·lant entre els 30 i els 60 MPa. La resistència a la flexió pot variar entre 20 i 40 MPa i la resistència a l'impacte és relativament gran, entre 30 i 50 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ gràcies, en part, degut a la seva elasticitat; es tracta d'un material altament flexible i elàstic, presentant un allargament a la ruptura de fins al 500%; és a dir, es pot elongar fins a 5 cops la seva mida original abans de que es produeixi la ruptura. Aquesta elasticitat li aporta al material una tenacitat

estructural destacable.

En termes de duresa, el rang existent al mercat va des del Shore 35 A fins al Shore 80 D. En el cas del filament utilitzat, es farà ús d'una duresa mitjana de 95 Shore A. Tot i que es tracta d'un material més bé tou, disposa d'una gran resistència a l'abradió, al desgast i a l'esquinçament, mantenint la seva integritat estructural i aparença després de sotmetre's a una forta fricció.

Actualment, les aplicacions del TPU s'estenen arreu de diversos camps a través, sobretot, de la fabricació per injecció en motlle; s'utilitza àmpliament en la fabricació de calçat esportiu i teixits tècnics per la seva flexibilitat i durabilitat, i per la sensació de confort que pot aportar; també s'usa habitualment en la fabricació d'embalatges i envasament flexibles en embolcalls d'alta resistència; en la indústria automotriu s'aplica el TPU en revestiments i guarnicions que hagin de patir manipulacions. També s'aplica en la fabricació de mànegues i canonades, cablejat i equipament mèdic. Tot i que els motlles d'injecció habitualment utilitzats s'enfoquen a la producció en sèrie, en els darrers anys, el TPU s'ha popularitzat com a matèria prima en la impressió 3D (FDM).

El reciclatge del TPU pot ser un repte a causa de la seva estructura química complexa, hi ha diverses metodologies per a portar-lo a terme. El reciclatge mecànic és el mètode més comú; consisteix en triturar el material per convertir-lo en grànuls, que es poden emprar per a la fabricació de nous productes. No obstant això, aquest procediment pot afectar lleugerament les propietats mecàniques del polímer. Una segona opció viable és el reciclatge químic; aquest és un procés més complex que implica descompondre el TPU en els seus components bàsics per a la posterior síntesi de noves resines o materials polimèrics. Aquest tipus de reciclatge pot oferir un major nivell de rendiment en les propietats del material reciclat però també comporta unes despeses i un consum de recursos molt superior. Quan el reciclatge mecànic o químic no és viable, el TPU pot ser utilitzat com a font d'energia a través de la incineració controlada (reciclatge energètic), amb un ús eficient dels residus per a la producció d'energia.

Com gairebé qualsevol altre polímer, les propietats químiques i mecàniques del TPU es poden modificar utilitzant additius, barrejant-lo amb altres polímers o modificant les condicions de producció. A causa de la tecnologia de FDM projectada, cal saber que les propietats mecàniques de les peces resultants es poden veure afectades per paràmetres de processament com ara la temperatura d'impressió, la velocitat d'impressió i de refredament, etc. Per tant, és necessari optimitzar les condicions d'impressió per obtenir les propietats mecàniques desitjades en els elements on s'utilitzi el TPU. Tot aquest procés de regulació es recull en l'apartat 5. *Plec de Condicions*.

A banda de les propietats generals tractades, en la següent taula (*Taula 8*) es recullen les característiques específiques del PLA utilitzat en el present projecte proporcionades pel fabricant:

Dades generals	Denominació	Poliuretà termoplàstic (TPU)
	Tipus de material	Polímer
	Classificació	Elastòmer lineal, termoplàstic
	Densitat	1,21 g·cm ⁻³
	Reciclatge	Sí, per degradació i fusió
Dades comercials	Fabricant	SUNLU filament
	Format	Filament (bobina)
	Model (referència)	TPU 3D
	Mides	Ø1,75±0,02 mm, 0,5 kg (300 m aprox.)
	Color	Blanc

	Preu	41,98 €/kg
Propietats químiques	Components principals	C, H, O, N
	Tipus d'enllaç majoritari	Covalent
	Organització atòmica	Molecular lineal, semicristal·lí
Propietats mecàniques	Mòdul de Young (E)	500,0 MPa
	Resistència a tracció (σ_{Rm})	39,0 MPa
	Deformació abans de ruptura (ϵ)	500 %
	Coefi. de Poisson (ν)	0,3
	Resistència a flexió	78,7 MPa
	Resistència a l'impacte – Charpy	35 kJ·m ⁻²
	Duresa (<i>Shore</i>)	95 Shore A
Propietats tèrmiques	T ^a fusió (T_m)	225°C
	T ^a transició vítria (T_g)	60°C
	T ^a degradació (T_d)	270°C
	Calor específic	1,5 kJ·(kg·K) ⁻¹
	Coefi. tèrmic d'expansió	7,5 $\mu\text{m}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
	Conductivitat tèrmica	0,15 W·(m·K) ⁻¹
	T ^a màxima d'utilització	80°C
	T ^a mínima d'utilització	-30°C

Taula 8. Propietats del TPU [8]

2. Disseny del braç articulat de mesura

A partir d'aquest punt es pot donar per finalitzada la primera etapa del projecte, la d'enginyeria d'estratègia bàsica, on s'ha presentat i planificat el què es farà, tot organitzant la informació general i els antecedents i estudis previs; també s'ha analitzant l'estat de l'Art envers els braços de mesura tridimensional per coordenades. Ara, aquest segon gran bloc de la memòria es centra en el procés de disseny pròpiament; aquí es recull el procés, la documentació i els detalls constructius essencials per desenvolupar un prototip funcional de BAMC d'acord amb les necessitats que es busquen satisfer. Així doncs, s'exposarà de forma minuciosa cadascun dels estadis del mètode a través dels quals una idea o un concepte inicial desemboca en un ens tangible i funcional.

2.1. Anàlisi de la problemàtica i concepte inicial

Per inicialitzar la part pròpia de l'enginyeria de concepte, la segona fase de la metodologia *PREDICA*, cal recordar i analitzar amb deteniment la problemàtica, la necessitat a la que aquest projecte busca donar resposta. Com ja s'ha comentat en les parts introductòries de la memòria (apartat 1.2.1. *Proposta*), el projecte desenvolupat en aquest document tècnic es centra en el desenvolupament del disseny, la fabricació i l'assaig funcional d'un braç articulat de mesura tridimensional per coordenades.

La necessitat que es busca satisfer sorgeix del requeriment d'un aparell mòbil, adaptable i precís per mesurar in situ diverses característiques dimensionals i/o de forma d'elements físics ja fabricats. La utilitat d'aquestes mesures ha de servir per poder dissenyar i fabricar altres elements que es puguin relacionar i integrar amb aquests. Repetint l'exemple ja introduït, la idea inicial que motiva aquest treball apareix de la mà del professor director del mateix; aquest, en un moment donat en el desenvolupament d'un projecte personal, es veu amb la necessitat de mesurar de forma fiable la posició de diferents punts del xassís d'una motocicleta (ancoratges d'amortidors, articulacions de direcció, etc.) per obtenir-ne un model tridimensional a partir del qual dissenyar certs elements funcionals que s'hi acoblaran. D'aquesta forma, es proposa obtenir un braç articulat de mesura tridimensional per coordenades amb una exactitud, precisió i reproductibilitat estables, conegudes ($\pm 0,1$ mm) i suficients com per assegurar un funcionament òptim i una suposada aplicabilitat industrial vàlida. El funcionament d'aquest aparell de mesura ha de desembocar en l'obtenció d'un arxiu en format text que reculli les coordenades relatives envers la posició dels diferents punts mesurats. Més enllà de les fronteres que abasta aquest projecte, la utilitat final recau en que aquest document de text pugui ser introduït com una matriu de punts en un software *CAD* per a generar-ne la geometria corresponent. Per tant, prèviament ha de poder ser comunicat o transmès des del braç de mesura a un processador o unitat computacional.

Resumidament doncs, es vol desenvolupar un model de BAMC tenint en compte l'existència d'un pressupost limitat, notablement inferior als preus presents al mercat, sense deixar de banda la funcionalitat i la precisió. Per això caldrà utilitzar materials i components comuns i de fàcil accés, i tecnologies de fabricació poc especialitzades. A mode orientatiu, aquestes són les anotacions inicials de l'autor en base a tota la informació recopilada i les conclusions extretes en apartats anteriors:

- a. Per simplificar en gran mesura el disseny estructural i els camps tècnics implicats, cal optar per un sistema d'adquisició de punts (SAP) per contacte (palpador). Aquests tipus de sistema no requereix de circuits integrats ni de controladors extres, pel que redueix en gran mesura el cost i la complexitat del projecte; el disseny d'un sistema de visió artificial òptica d'escaneig dista molt dels objectius marcats.

- b. El rang o abast del braç, entès com a sinònim de volum útil de mesura, s'ha de trobar entre 1 i 1,5 m.
- c. Pel que fa al format estructural, el nombre d'articulacions (graus de llibertat) elegit ha de tenir en compte les implicacions en la precisió i els resultats de mesura del braç articulat, així com la rigidesa, l'estabilitat i la durabilitat requerides.
- d. Per a la construcció de les parts purament estructurals (segments del braç) es pot utilitzar alguna mena d'element tubular prefabricat amb una relació rigidesa-massa òptima.
- e. En termes de components, els encòders òptics esdevenen la millor opció per al càlcul dels desplaçaments angulars en les articulacions del braç.
- f. Amb això, es requereix d'alguna mena de microprocessador que sigui capaç de suportar un software que recopili les mesures angulars dels encòders i les transformi en la posició en coordenades del punt de mesura marcat pel palpador. Aquest microprocessador hauria de disposar de les suficients entrades i una certa autonomia de funcionament (bateria integrada) per assegurar la mobilitat del BAMC.
- g. Si més no, també es pot incloure una pantalla per modificar certs paràmetres de funcionament i un accionador que, activat per part de l'usuari, iniciï el procés de mesura.
- h. També cal incloure algun tipus d'accionament per pressió o botó que permeti a l'operari inicialitzar o parar el procés de mesura des del manipulador on es situa el SAP.
- i. Per aportar encara més valor al projecte, el programa o software de mesura es desenvoluparà des de zero i per mitjà d'un llenguatge de programació de codi obert, compatible amb els components funcionals utilitzats, per abaratir costos i assegurar-ne l'accessibilitat universal. L'entorn de programació *Arduino*, entre d'altres, en podria ser una opció factible.

2.2. Esbossos i disseny inicial

En aquest punt de la memòria, el concepte de creativitat adquireix una notable importància. A partir dels antecedents comercials analitzats, la informació prèvia recollida i en funció de la necessitat exposada, tot incorporant elements innovadors propis, es pot passar a l'elaboració de diversos croquis primitius per començar a donar forma a les idees inicials envers el disseny del BAMC. Així doncs, es mostraran a continuació diferents opcions esquemàtiques de disseny d'entre les que se n'elegirà una per a ser desenvolupada. Cal fer incís en que els esbossos exposats a continuació no inclouen una gran quantitat de detalls constructius. Si més no, la seva utilitat és la d'introduir una idea o concepte generalitzat i inicial de la direcció en la que s'anirà desenvolupant el procés de disseny.

2.2.1. Alternativa de disseny 1

El primer croquis inicial d'un possible model de braç articulat de mesura s'allunya considerablement d'allò observat en el mercat. Estèticament i formal, s'apropa notablement al disseny típic d'un braç

robòtic industrial – de fet, aquests elements autòmats són la principal font d'inspiració –. La idea general que envolta aquest esbós es la d'un braç de mesura d'alta mobilitat, amb fins a 6 articulacions o graus de llibertat, capaç de recollir mesures precises en les peces geomètricament més complexes. Alhora, les articulacions estan fonamentades en el concepte de mecanisme harmònic, un sistema mecànic coaxial habitualment utilitzat com a reductor en actuadors i aparells robotitzats. A través d'aquest sistema reductor, utilitzat a la inversa com a multiplicador, es pot calcular el desplaçament angular de cadascuna de les articulacions (augmentat pel factor de transmissió determinat) a través d'encòders òptics, fent créixer la precisió d'aquests aparells electrònics.

Aquests aniran integrats a l'interior de les pròpies articulacions per dotar d'un aspecte més homogeni i clar al BAMC. Amb tot, s'ha intentat generar un disseny minimalista però que transmeti robustesa i rigidesa, paràmetres necessaris per assolir mesuraments precisos. Igualment, la longitud dels segments entre articulacions és mínima per evitar l'augment de l'error.

La major part de peces funcionals es fabricaran per mitjà d'impressió tridimensional (FDM), mentre que l'estructura general es formarà d'algun tipus d'element tubular comercial prefabricat. La base anirà preparada per a ser collada per mitjà de diversos cargols sobre una superfície gran i estable, que esdevindrà el recolzament de tot el braç durant la seva utilització.

En contrapartida a un disseny compacte i una versatilitat elevada, aquest possible prototip de braç articulat de mesura també presenta una sèrie d'inconvenients. D'entre aquests en destaca la problemàtica implícita en la gestió de l'emmagatzemament dels encòders a l'interior de les articulacions i del cablejat que connecta tots els elements electrònics de control; cal coordinar el pas del cablejat a través de seccions la posició relativa de les quals no es manté constant i, fins i tot, pot entrecreuar-se en funció de la disposició del braç. Per altra banda, cal recordar que, a major nombre d'articulacions, menor acostuma a ser la precisió en les mesures efectuades. Així mateix, un major nombre d'articulacions implica una major complexitat en el muntatge, amb el conseqüent augment de volum constructiu, pes, esforços suportats a la base, etc.

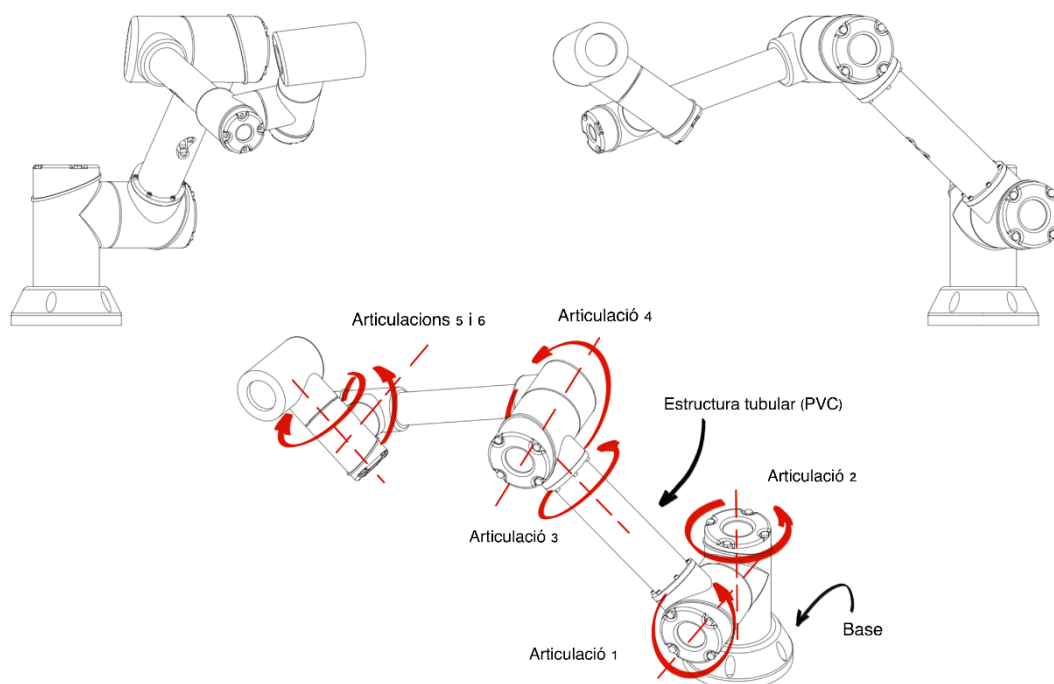


Fig. 24 Esbós (I) de proposta de disseny de BAMC

2.2.2. Alternativa de disseny 2

Un segon croquis d'un possible disseny de BAMC a desenvolupar és el presentat en la figura adjunta. Es tracta d'un disseny més estilitzat, clarament inspirat en els models comercials habituals de braços de mesura tridimensional. Alhora, està pensat per a l'avaluació de posicions allunyades i longituds grans per mitjà d'un volum útil de mesura elevat.

En aquest cas, es projecta una cadena cinemàtica formada per 5 articulacions funcionals, el desplaçament angular de les quals es registrarà, i una última articulació només destinada a possibilitar el moviment rotatori del sistema d'adquisició de punts. Les articulacions estan dissenyades alternant mecanismes harmònics (articulacions paral·leles) amb mecanismes cicloïdals (articulacions perpendiculars); aquest últim sistema de transmissió mecànica coaxial ja ha estat introduït en apartats anteriors (1.3.2. *Mecanisme cicloïdal*). Alhora, aquestes articulacions es troben agrupades en parells distanciats entre sí per segments tubulars que conformen l'estructura global de la màquina de mesura. Alhora, el desplaçament angular de les articulacions anirà recollit també per mitjà d'encòders òptics; ara van situats externament, amb una certa excentricitat, permetent-se el seu moviment de forma lliure i una millor gestió del cablejat.

Per altra banda, també s'ha inclòs un possible disseny d'un sistema d'adquisició de punts per contacte que incorpora un mànec ergonòmic per a una millor subjecció i comoditat a l'hora d'usar l'aparell. A efectes pràctics, el SAP incorporaria un botó o accionador per controlar el procés de mesura sense que l'usuari hagi d'actuar directament sobre el microcontrolador allunyant-se de la zona de mesura. Aquest mateix SAP és el que es projecta que puguin incorporar la resta d'alternatives de disseny presentades en aquest apartat de la memòria.

El processos de fabricació enginyats i la base del braç projectats són idèntics als que s'ha exposat, respectivament, en l'anterior esbós.

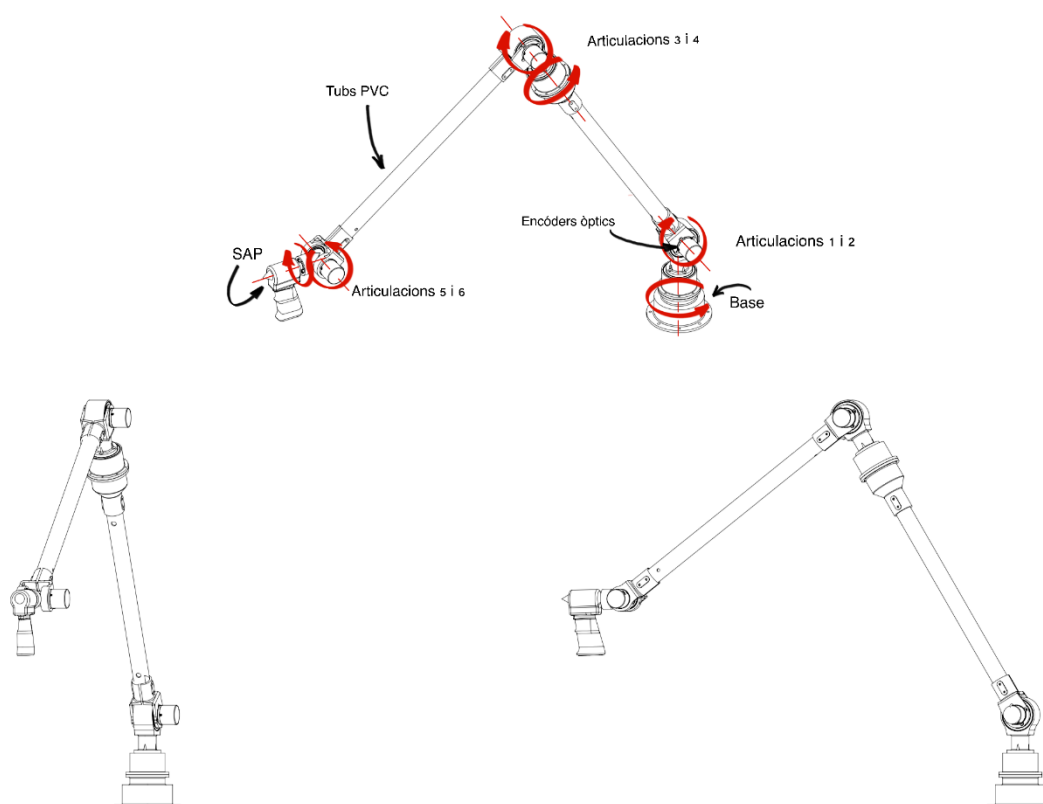


Fig. 25 Esbós (II) de proposta de disseny de BAMC

Les particularitats negatives d'aquest possible prototip recauen en la utilització de diverses tecnologies per a augmentar la resolució dels encòders en les articulacions i en el fet que els segments en que es divideix el braç són de gran longitud. Això últim, tot i aportar un major VUT, en redueix la precisió així com la versatilitat i la comoditat a l'hora de realitzar mesures. Així mateix, els esforços als que es sotmet a la base del braç, en termes de moments, sobretot, són substancialment majors només pel fet que els centres de massa dels diferents elements que el componen es troben més allunyats en el cas d'una extensió parcial o completa. Per altra banda, la gestió del cablejat no es soluciona totalment, sobretot en el cas de les dues articulacions paral·leles, és a dir, les articulacions l'eix de rotació de les quals és paral·lel (coincident) amb el segment del braç on es troben instal·lades.

2.2.3. Alternativa de disseny 3

La tercera i última de les alternatives de disseny intenta, d'alguna forma, agrupar i incloure les característiques positives dels models anteriors tot eliminant aquelles particularitats que representen implicacions perjudicials. Tanmateix, el seu aspecte visual també recorda al d'un braç industrial robotitzat per la seva estructura robusta i sòlida.

En aquest cas es preveu la presència de 5 articulacions o punts de gir independents, basats en variants del mecanisme cicloidal per augmentar la resolució de mesura d'encòders òptics incorporats a l'interior de les mateixes. L'articulació 6 no conté cap encòder i només serveix per augmentar la mobilitat del SAP. En aquest cas però, al contrari que en els anteriors croquis, s'eliminen els components estructurals tubulars per donar pas a un cos totalment fabricat des de zero per impressió tridimensional i buit, en gran mesura. Així es possibilita el moviment lliure i l'organització del cablejat que conforma el circuit electrònic de mesura.

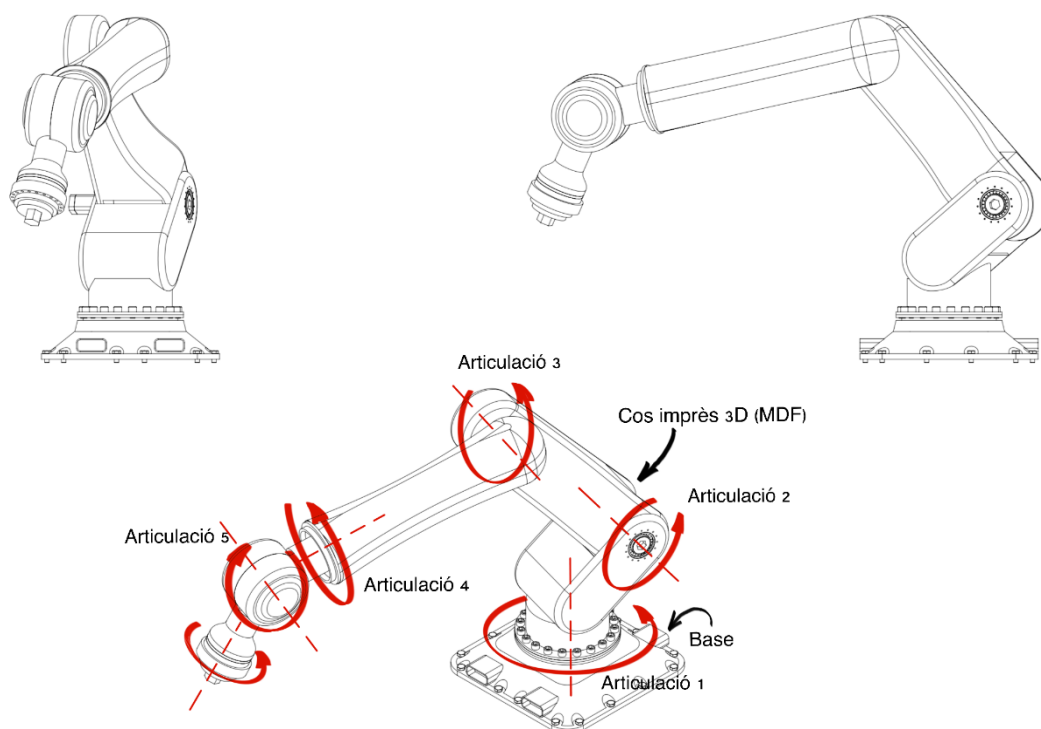


Fig. 26 Esbós (III) de proposta de disseny de BAMC

Negativament, la disposició estructural del braç limita el seu VUT i la seva mobilitat general. Alhora, el fet que tot el cos es fabriqui per FDM genera uns costos materials i energètics molt superiors als de la resta de dissenys presentats. Igualment, és probable que aquest procés de fabricació provoqui que el pes del conjunt del BAMC augmenti considerablement, reduint-se l'accessibilitat en ús en termes de comoditat i esforços realitzats per part de l'usuari.

2.2.4. Elecció final de l'alternativa de disseny

D'entre els diferents croquis presentats, l'opció més coherent i indicada per esdevenir el punt de partida del disseny exterior del braç de mesura projectat és l'alternativa 2. A priori, és l'esbós que més assembla als models comercials analitzats en termes d'aspecte i dimensions generals. Constructivament parlant però, és la variant de BAMC més senzilla, amb menys estructura fabricada per impressió 3D – més lleugera, per tant – i en contrapartida, amb un major VUT, pel que permet treballar amb peces de majors dimensions. No s'ha d'oblidar que la necessitat primària original que busca cobrir aquest projecte és, resumidament, la d'efectuar mesures en un element ja existent de geometria més o menys complexa.

Així mateix, l'opció 2 mostra una millor possible gestió de l'ordenació del cablejat i els components electrònics que cal incorporar. Això és gràcies a una estructura tubular plàstica majoritàriament buida i a portar els encòders òptics situats de forma externa a les articulacions.

Amb això, i tal i com es veurà durant el desenvolupament de l'apartat següent, s'han aportat diverses modificacions a l'alternativa de disseny elegida. D'entre les més significatives, per raons de dimensionament, de resistència i de complexitat en el disseny, el BAMC final comptarà amb només 5 articulacions diferenciades en comptes de 6. La marcada com *articulació 3* en la figura anterior (Fig. 26), s'elimina del disseny final. Aquesta articulació resultava força conflictiva envers la gestió del cablejat interior, donat que l'encòder projectat, i les seves connexions, rotaven solidàriament amb la resta del braç. Així mateix, a nivell d'estudi cinemàtic i de programació del software de mesura, l'eliminació d'aquesta articulació ha simplificat molt els procediments a realitzar. Alhora, mantenint un mateix VUT genèric, i sols perdent una mica de mobilitat i versatilitat, reduir el nombre d'articulacions implica necessàriament augmentar la precisió. Igualment, es redueix el cost de fabricació (quantitat de material, elements normalitzats, elements electrònics i elèctrics, etc.) i la massa total del braç.

A banda d'aquesta modificació cabdal, també s'han reforçat diversos punts de l'alternativa de disseny inicial com puguin ser el topall de l'articulació de la base, la pròpia base i els eixos centrals de totes les articulacions. Així mateix, també s'ha afegit un suport modular pel microcontrolador utilitzat per governar l'aparell.

2.3. Disseny modular mecànic

En aquest punt s'inicia la tercera etapa de la metodologia *PREDICA*, la denominada com enginyeria del detall. A partir de l'opció de disseny de braç de mesura elegida en l'apartat anterior, cal passar a l'acció elaborant un model formal, que inclogui tots els components estructurals i funcionals que resulten necessaris per assegurar-ne aquestes dues dimensions d'utilitat. Cal remarcar que només es presentarà l'alternativa modular de disseny final i definitiva; la totalitat del procés creatiu, donada la seva complexitat i extensió, s'ha resumit en l'apartat anterior.

L'opció més adient, i habitual, per a l'elaboració d'un model tridimensional és fer ús d'un programari de modelat per generació de sòlids o *CAD*. En aquest projecte es farà ús del software *SolidWorks*. Aquest esdevé una eina àmpliament utilitzada en l'àmbit de la producció industrial i permet aplicar eines de simulació mecànica i assaig tensional als models generats per dimensionar-los d'acord amb les sol·licitacions que experimentaran en la realitat.

En aquest apartat s'anirà desglossant el disseny de cadascun dels mòduls o conjunts que conformen el BAMC projectat, explicant-ne les peculiaritats i el procés d'enginyeria del que es genera. Tot aquest procés anirà il·lustrat amb figures extreïdes directament d'aquest model tridimensional. Per mitjà d'un ensamblatge final es podrà visualitzar un prototip final del braç de mesura a partir del qual es podran extreure plànols de conjunt, especejament i fabricació. Alhora, aquest primer prototip permetrà aplicar tècniques de simulació i processos de càlcul per assegurar el correcte dimensionament i funcionament de cadascuna de les peces dissenyades, així com la interacció entre les mateixes quan es sotmeten a les sol·licitacions pròpies de l'ús durant el procediment de mesura. En aquesta direcció, tots els elements que componen l'estructura funcional mecànica del BAMC s'han dissenyat seguint uns conceptes genèrics comuns:

1. Homogeneïtat i simplicitat

El braç de mesura projectat és un aparell poc complex, en tots els sentits. Tanmateix, donat que el seu desenvolupament i construcció s'han portat a terme de forma íntegra durant aquest projecte, el fet que la majoria de components segueixin una tendència homogènia i unificada en termes de disseny alleugera molt els processos consegüents requerits. Per exemple, tal i com es veurà, la majoria d'articulacions del braç segueixen un mateix model constructiu estàndard. Això simplifica notablement el procés de disseny, però també la fabricació, el muntatge i el manteniment així com els processos de simulació, càlcul i dimensionament de totes les peces implicades. En definitiva, dissenyar els components del BAMC tenint en compte el concepte d'homogeneïtat és una excel·lent forma d'optimitzar i economitza recursos i el desenvolupament general del projecte.

Per altra banda, la simplicitat, aplicada en tots els aspectes possibles, també aporta els beneficis que deriven d'allò homogeni. Tanmateix, el present projecte busca la materialització d'un prototip funcional, fent especial èmfasi en el rendiment i la utilitat. Una construcció simple, amb un nombre reduït de peces i de fàcil ensamblatge, dona peu a un menor marge per a l'error al mateix temps que s'economitzen els recursos.

Ambdós conceptes, per tot el que impliquen, doten al producte final d'una coherència global que aporta qualitat i confiança en el seu funcionament.

2. Robustesa i seguretat

Al cap i a la fi, un BAMC és un aparell de mesura, una eina funcional que serà utilitzada amb menys o més mesura per un o diversos usuaris amb una finalitat concreta. Tenint en compte que és un aparell dinàmic, el funcionament del qual es basa precisament en el moviment relatiu entre les seves parts, interessa que el disseny de les peces estructurals i mecàniques sigui robust i resistent. El braç de mesura ha de poder manipular-se adaptant-se als requeriments de l'operador amb la seguretat de que podrà suportar les sol·licitacions a les que es sotmeti. Amb això en ment, la gran majoria de peces es troben àmpliament reforçades; entre moltes altres mesures, s'han inclòs nervis a les superfícies en voladís i s'han incorporat gruixos elevats en topalls i parts susceptibles a la ruptura. Alhora, els cantells vius han estat substituïts majoritàriament per arrodoniments. Igualment, les unions cargolades van dotades de volanderes per repartir la pressió efectuada en la unió. Per altra banda, en tot el procés d'estudi i selecció de materials (*1.6. Estudi de materials*) ja s'ha tingut en compte aquesta necessitat.

3. Accessibilitat i pragmatisme

Per últim, el BAMC ha de resultar accessible en tots els nivells de la seva vida útil i per a tots els usuaris que hi entrin en contacte, des de en el procés de muntatge fins en la pròpia utilització, passant pel manteniment o el reciclatge final. El seu ús ha de ser intuïtiu i relativament fàcil, sense perdre's la fiabilitat ni la precisió requerides. Sota cap precepte la utilitat pot veure's eclipsada pel disseny o l'estètica; cal fer prevaldre el pragmatisme i la facilitat en l'ús. Igualment, tant el muntatge com el manteniment posterior han de facilitar la tasca a l'operari.

En aquest cas, les característiques d'accessibilitat i funcionalitat tenen molt a veure amb la homogeneïtat i la simplicitat tractades abans; no hi ha cas de complicar en excés cap paràmetre de disseny ni del funcionament del BAMC sempre i quan se'n preservi el rendiment.

En qualsevol cas, a banda de la informació presentada en els següents apartats, per obtenir un major aprofundiment tècnic envers el disseny i la construcció de qualsevol de les peces dissenyades es poden visualitzar el punt 4. *Plànols* d'aquest document.

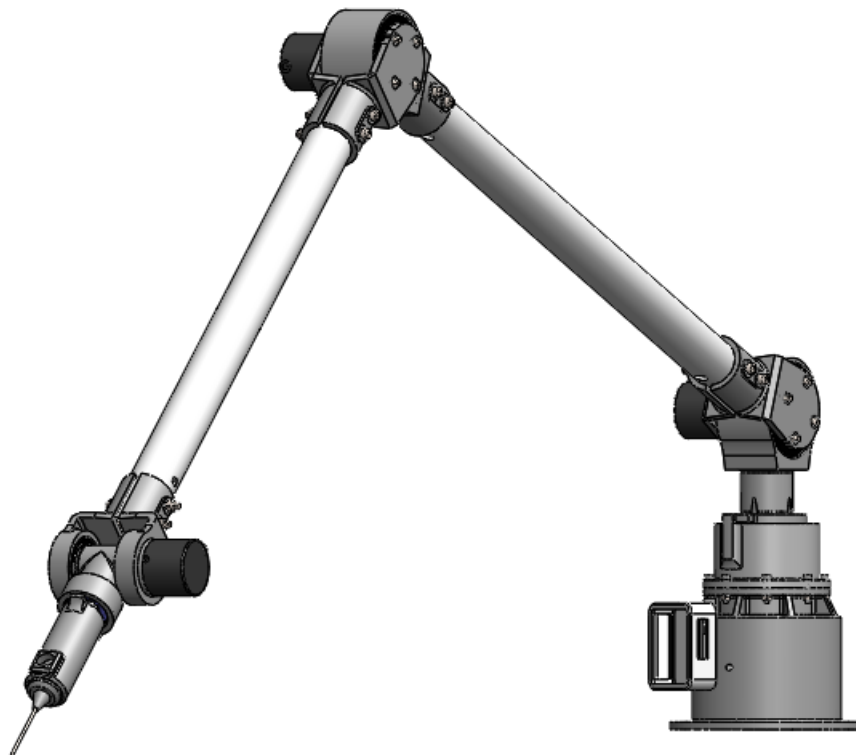


Fig. 27 Disseny modular (*SolidWorks*) final del BAMC projectat

2.3.1. Articulacions

Les articulacions esdevenen l'element més crític en termes del disseny funcional i estructural del BAMC projectat en aquesta memòria. Si més no, queda clar que són parells de revolució i, per tant, disposen d'un sol grau de llibertat, permetent només la rotació relativa entre els elements que uneixen. Tanmateix, la tecnologia que incorporen esdevé determinant a l'hora d'obtenir mesures per coordenades precises. Així doncs, seguint la dinàmica marcada pel mercat (1.4. *Estudi de mercat*), les articulacions incorporen encòders òptics encarregats de mesurar els desplaçaments angulars i deduir-ne, a partir d'aquests, la posició del SAP, és a dir, les coordenades del punt

mesurat. Alhora, s'observarà que les articulacions projectades del braç de mesura mantenen una tendència de disseny modular molt similar per simplificar els processos de dimensionament, fabricació, muntatge i manteniment.

El BAMC desenvolupat en aquesta memòria compta amb 5 articulacions diferenciades. D'aquestes, només 4 compten amb encòders òptics per registrar-ne la rotació i 3 disposen d'un sistema mecànic d'augment de la precisió de lectura en la rotació.

2.3.1.1. Especificacions generals de les articulacions

El braç de mesura tridimensional per coordenades projectat és una màquina de mesura de funcionament manual; això implica que el posicionament del sistema d'adquisició de punts o SAP es realitza, en major o menor mesura, per mitjà de l'acció directa d'un operari. Això té una sèrie d'implicacions negatives en termes de claredat i brusquedat de moviments i maniobres, manteniment de la posició, etc. El que busca el disseny de les articulacions és, en qualsevol cas, minimitzar la transmissió d'aquestes implicacions al procés intern del BAMC d'obtenció de mesures. Es busca esmorteir les afectacions que puguin patir la precisió, la reproductibilitat i altres característiques metrològiques rellevants.

Així doncs, els conceptes generals rere les peculiaritats que incorpora el disseny de les articulacions, procés que s'anirà exposant detalladament en els següents compassos del projecte, es poden resumir en els següents punts:

1. Estabilitat posicional

En l'instant en el que es pren la mesura, després de l'accionament per part de l'usuari, el software intern realitza la recaptació de dades dels encòders situats en les articulacions i en dedueix la posició final del SAP. Per tant, el manteniment d'una posició estàtica de tots, i entre tots, els components del BAMC esdevé indispensable. Així doncs, les articulacions han de presentar una certa reacció al moviment, una component de frec o impediment dinàmic controlat que ajudi a eliminar moviments no desitjats; l'usuari ha de poder moure el braç lliurement i col·locar-lo en la posició que requereixi la mesura, però aplicant un esforç (mínim) determinat. Alhora, els elements que conformen estructuralment el braç no s'han de moure per si sols, o per acció de components o accions internes com el seu propi pes, per exemple.

2. Control de la mobilitat

Tal i com es dedueix en el punt anterior, mentre l'operari posiciona el BAMC per a realitzar una mesura, els moviments han de ser, en la mesura que sigui possible, suaus, continuats i precisos, sense una tolerància desmesurada. Les articulacions han de permetre el moviment però sense alliberar-lo tant que les peces que formen el cos del braç llisquin entre si per si soles. Això evitaria la necessitat d'incorporar sistemes de frenada, de control dinàmic o contrapesos tal i com ho fan alguns models comercials analitzats. Aquests sistemes impliquen un major grau de complexitat en el disseny global del braç de mesura, amb el conseqüent augment dels costos productius.

3. Control de la tolerància

En termes de toleràncies dimensionals constructives, cal limitar-les per evitar un excés de joc entre peces contigües i la conseqüent aparició de freds i sorolls innecessaris. A efectes pràctics això pot significar implementar articulacions recolzades per un doble rodament i ajusts entre peces per pressió o fins.

4. Accessibilitat i homogeneïtat

L'accessibilitat ve referida en aquest cas a que el disseny de les articulacions ha de facilitar, en certa manera, el procés de muntatge i les tasques de manteniment. Les peces dissenyades han de poder acoblar-se entre sí sense dificultat i canviar-se fàcilment en cas de ruptura o desgast.

Per altra banda, el fet que les articulacions del BAMC projectat tinguin una tipologia i una estructura similar, amb uns components estàndards unificats o iguals entre totes les articulacions, permet simplificar molt les tasques d'assaig i dimensionament així com els processos de fabricació i muntatge.

5. Optimització dimensional

Totes les característiques fins ara esmentades han de donar-se sense perdre el compromís amb unes dimensions compactes i una massa total de components fabricats igualment reduïda; alhora, la rigidesa estructural ha d'assegurar una estabilitat suficient per a la presa de mesures. Així doncs, tant els materials utilitzats com la pròpia tecnologia de les articulacions han de permetre assolir aquests requeriments. D'aquesta forma s'estalvia en costos materials i productius, i s'eviten problemes de moviment anteriorment esmentats. També s'assegura l'accessibilitat i la mobilitat de l'aparell en termes de localització de funcionament.

6. Augment de la resolució

En paràgrafs anteriors s'ha esmentat també el paper que juguen els components electrònics coneguts com encòders, i en concret els encòders òptics que s'han seleccionat per a desenvolupar aquest projecte (2.4.2. *Encóder òptic*). Per assolir la precisió de mesura plantejada com a objectiu en la part introductòria d'aquesta memòria, i tenint en compte la problemàtica geomètrica que implica la deducció de la posició final del SAP, la posició del punt de mesura, doncs, caldria fer ús d'encòders òptics d'alta resolució. Aquests components compten amb preus de venda molt elevats que implicarien la pèrdua de certa idiosincràsia, pròpia del present treball, tot i que facilitarien el procés de disseny.

Per aquests motius s'ha optat per idear un sistema de transmissió mecànica basat en engranatges cicloïdals (1.3.2. *Mecanisme cicloïdal*) la relació de transmissió del qual sigui de reducció inversa (multiplicació). Amb això s'aconsegueix que un moviment angular real en una de les articulacions d' n° , per exemple, esdevengui en bornes de l'encóder d' $i \cdot n^\circ$, essent i la relació de transmissió. Així doncs, incorporant aquest factor de conversió en el software de mesura, es pot augmentar substancialment la resolució d'un encóder òptic estàndard que, a priori, no ofereix les millors prestacions sense sacrificar-ne el cost econòmic. Alhora, aquesta mateixa relació de transmissió o ràtio de reducció provoca que els esforços transmesos als components electrònics de l'articulació es redueixin a partir dels aplicats realment. Així mateix, es preveu que el freqüència ofert per aquest tipus de sistema mecànic ajudi a l'estabilitat posicional i al control de la mobilitat.

Per altra banda, la pròpia naturalesa del disseny de BAMC projectat implica fer una distinció entre dues tipologies d'articulacions:

- a. **Articulacions paral·leles:** són les articulacions l'eix de rotació de les quals és paral·lel als membres que uneix. En el disseny són paral·leles les articulacions A i E.
- b. **Articulacions perpendiculars:** són les que compten amb un eix de rotació perpendicular a la longitud dels elements estructurals que relacionen. Les perpendiculars són les B, C i D.

Aquesta distinció no implica que el fonament o el concepte funcional central canviï d'un tipus a un altre d'articulació, però el disseny global sí que ho farà per possibilitar la coordinació entre les diferents peces i el correcte funcionament del braç articulat. Tanmateix, com es veurà en el següent

apartat i com ja s'ha esmentat anteriorment, de les 4 articulacions (A, B, C i D) on s'efectuen mesures de desplaçaments angular (inclouen encòders òptics), només les 3 primeres (A, B i C) incorporen un sistema mecànic d'augment de resolució basat en un mecanisme cicloidal. Així doncs, el mecanisme cicloidal és el sistema de transmissió mecànica coaxial seleccionat per a la construcció de les 4 primeres articulacions del braç articulat de mesura per augmentar la resolució dels encòders òptics que incorporen. La seva conformació i els paràmetres que defineixen els diferents components dels que disposa es detallen a l'apartat 1.3.2. *Mecanisme cicloidal*.

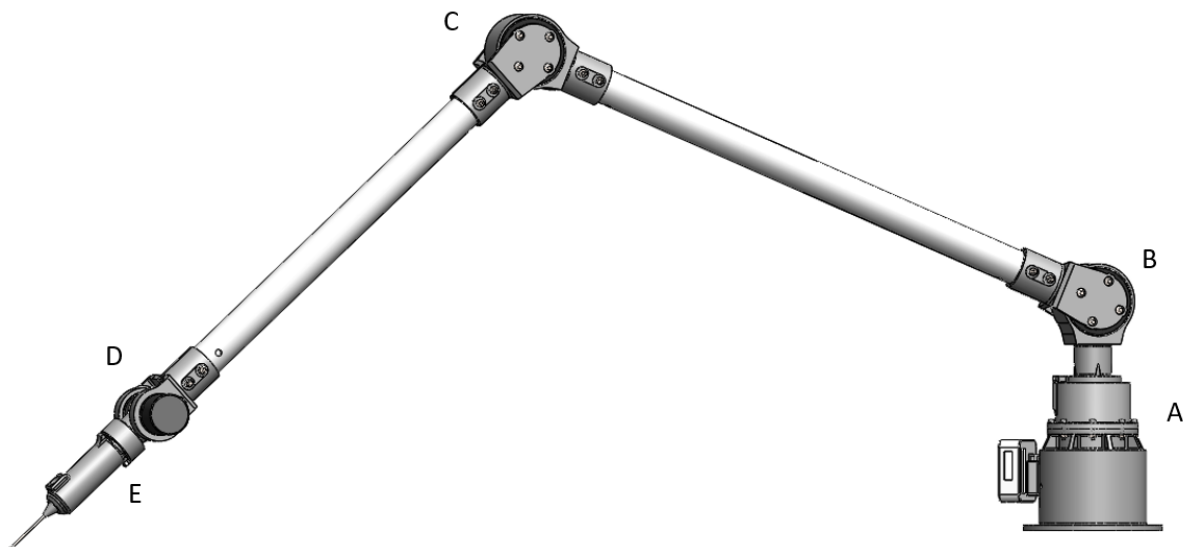


Fig. 28 Posicionament de les unitats articulars del BAMC projectat

2.3.1.2. Disseny de les articulacions perpendiculars (B i C)

Les articulacions perpendiculars que inclouen mecanisme cicloidal i encòder òptic (B i C) esdevenen punts especialment conflictius per la disposició ortogonal del seu eix de rotació, entorn el que es dona el grau de llibertat, envers els dos membres estructurals que mantenen en contacte, longitudinalment. Així doncs, cal tenir en compte que, degut a la disposició de l'articulació, un desplaçament angular mínim en una de les articulacions, implica una variació lineal de posició de magnitud considerable en l'articulació immediatament següent a l'anàlitzada o en l'extrem del segment tubular; aquesta variació es donarà en la direcció perpendicular a l'eix de rotació de la primera articulació, i es magnificarà de forma directament proporcional a la distància que separa ambdós parells cinemàtics (longitud de l'element estructural compartit). Així doncs, és en les articulacions perpendiculars en les que el concepte d'augment de la resolució adquireix un major sentit donat que serveix per evitar cometre grans errors de mesura.

Per al disseny d'aquestes articulacions s'ha optat per una corona cicloidal externa que s'uneix per mitjà d'un eix inferior a la tapa superior de l'articulació paral·lela immediatament anterior. De forma concèntrica a la corona, s'hi situen dues bases que s'acoblen entre elles per formar la cavitat cilíndrica on s'acollirà el pròxim segment tubular de PVC. L'acollament es realitzarà per mitjà de dos orificis passants i coincidents amb els situats en cada extrem dels tubs de PVC.

A l'interior de la corona s'hi disposen els dos discs cicloidals collats a l'eix excèntric i els passadors d'alumini seguint la disposició explicada en l'apartat anterior. Els elements normalitzats (cargols, rodaments, femelles, etc.) també es mantenen igual.

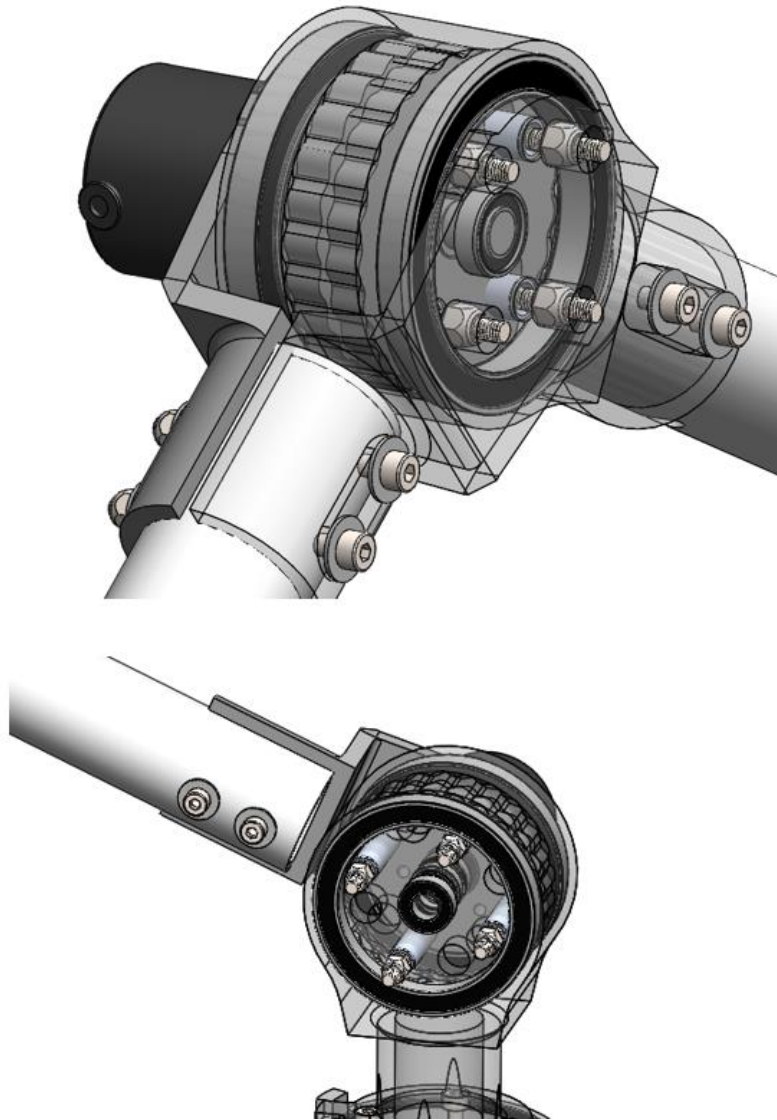


Fig. 29 Detalls constructius de les articulacions C (dalt) i B (baix)

2.3.1.3. Disseny de l'articulació paral·lela (A)

Només hi ha una única articulació paral·lela que compti amb encòder i sistema d'augment de precisió, la primera de les articulacions i la que es troba collada a la base del BAMC, l'articulació A. Aquesta compta amb un eix de rotació en la mateixa direcció que l'eix longitudinal principal dels elements que uneix, no presenten les complicacions de maximització d'errors propis de les articulacions perpendiculars. Tanmateix però, per disposar d'una resolució de càlcul de desplaçament angular homogènia entre totes les articulacions, s'ha optat per implementar el mateix sistema de mecanisme cicloidal detallat en l'apartat 7.1. *Disseny del mecanisme cicloidal*, però de forma adaptada.

En aquest cas s'utilitza una corona tubular externa (corona tubular) que permet l'acoblament de la base superior solidària a la corona de l'articulació perpendicular posterior. L'interior de la corona tubular contindrà els elements habituals en el mecanisme cicloidal, incloent els elements normalitzats corresponents. A diferència de les articulacions perpendiculars però, la base inferior esdevé aïllada i independent de cap altra peça (base tubular inferior) servint només com a punt de

recolzament per a l'eix excèntric i els passadors d'alumini, i com a subjecció per a l'encóder. Aquest últim donarà voltes a l'interior de la cavitat formada per la corona tubular i la peça a la que s'uneix aquesta; en el cas de l'articulació A es tracta d'un acoblament cilíndric que efectua la funció de base (acoblament base). Aquest acollament es realitza per mitjà d'un sistema similar al ja vist en les articulacions perpendiculars, basat en la presència d'una cavitat cilíndrica amb dos forats passants i coincidents amb els del tub de PVC. Alhora, s'incorpora entre les peces corona tubular i corona-base sup. un topall físic que limita la rotació del conjunt – i la de tot el braç de mesura – a gairebé una revolució completa (345°). Aquesta peculiaritat de disseny evita que es realitzin excessives rotacions en l'articulació de la base per tal de no malmetre al cablejat de l'encóder; aquest es troba completament amagat a simple vista, a diferència del cablejat de la resta d'articulacions, pel que un hipotètic embolic no es podria percebre visualment.

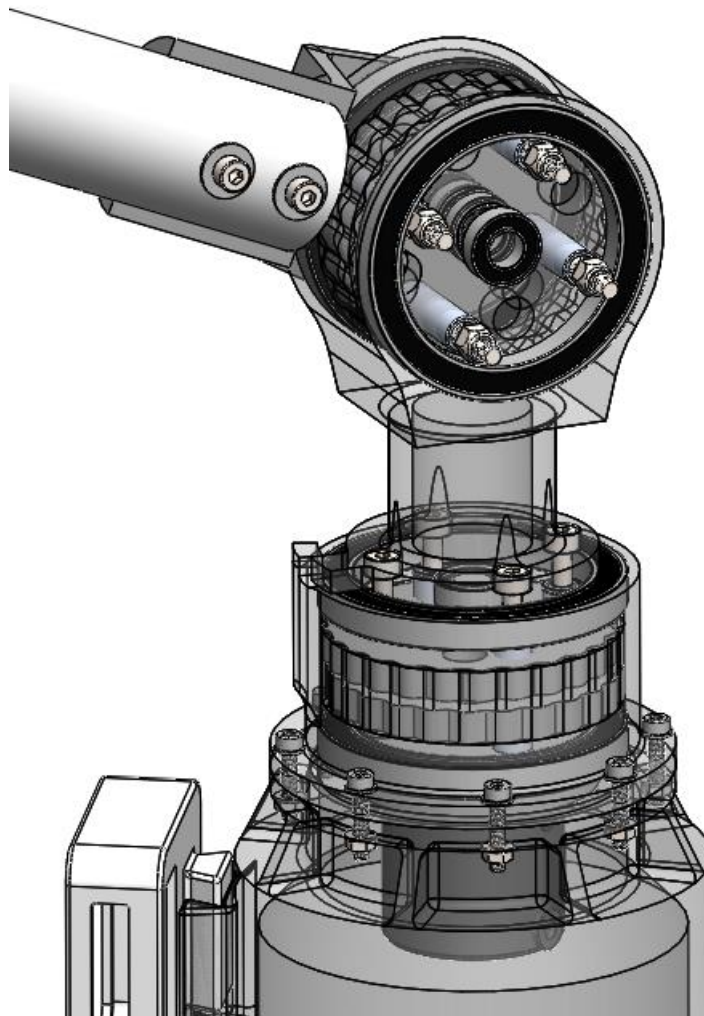


Fig. 30 Detalls constructius de les articulacions B (dalt) i A (baix)

2.3.1.4. Disseny de l'articulació perpendicular final (D)

De les 5 articulacions projectades, només 3 de les 4 que inclouen encóder òptic incorporen un mecanisme cicloidal de multiplicació coaxial. L'articulació D, l'última de les que incorporen encóder, no compta amb sistema de multiplicació cicloidal i és de tipus perpendicular. És l'articulació pròpia de l'eix del manipulador on es situa el SAP, és a dir, el punt de mesura, i la distància entre el seu

centre de rotació i aquest no supera els 140 mm. Així doncs, tenint en compte el poc marge d'error que hi ha amb aquesta distància, s'ha considerat que la precisió primària de mesura de l'encòder òptic utilitzat és suficient. Per tant, s'ha optat per alleugerir encara més el disseny del BAMC en el seu extrem funcional i no incloure el muntatge de multiplicació cicloidal. Contràriament, el disseny presenta un eix d'articulació cilíndric amb un doble rodament connectat directament a l'entrada de l'encòder. Alhora, aquest eix està gairebé totalment buit per permetre el pas del cablejat del botó de control situat en el manipulador.

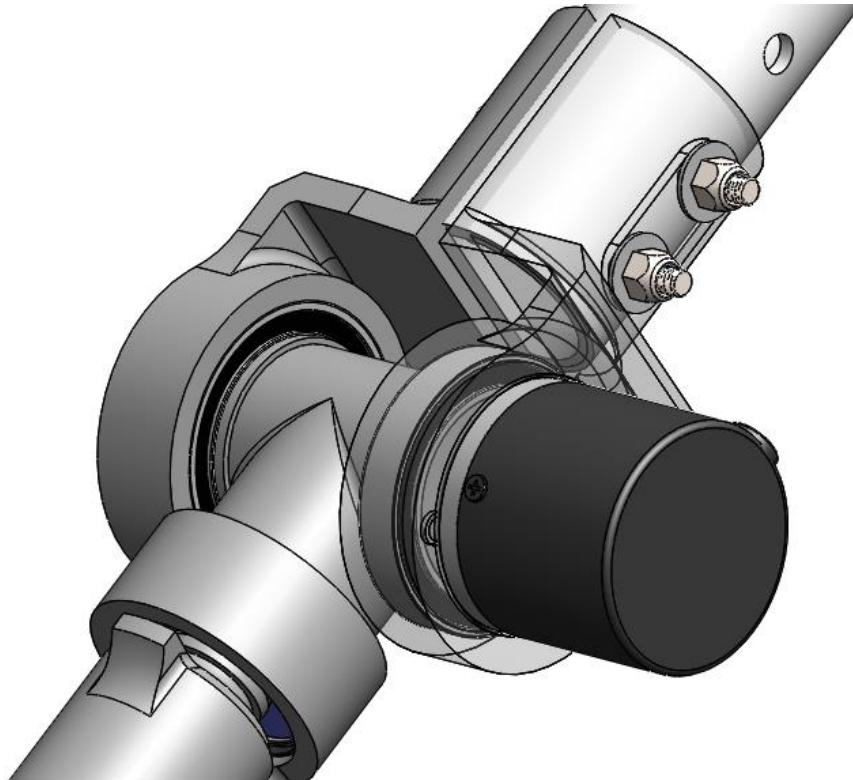


Fig. 31 Detalls constructius de l'articulació D

2.3.1.5. Disseny de l'articulació del manipulador (E)

L'última de les articulacions incloses en el disseny, l'E, és una articulació paral·lela molt simple, formada per un sol rodament situat en una cavitat sorgida de l'eix de l'articulació anterior (D). A aquest rodament s'hi connecta un segon eix de menors dimensions que forma part del cos del manipulador, el disseny del qual es tractarà detingudament en l'apartat següent. La subjecció de tots aquests elements es realitza per mitjà d'un seguit d'anells de seguretat o anells *Seeger* normalitzats. Cal tenir en compte que tots els eixos i elements passants han d'estar foradats o buits per permetre el pas del cablejat del botó de control instal·lat en el manipulador cap a la base, on es situa el microcontrolador.

Per altra banda, tal i com passava amb l'articulació A, s'ha incorporat entre el manipulador i la junta de l'articulació un topall físic que limita la rotació del conjunt a menys d'una revolució completa (345°). Això evita que es realitzin excessives rotacions en l'articulació del SAP per tal de no malmetre al cablejat del polsador.

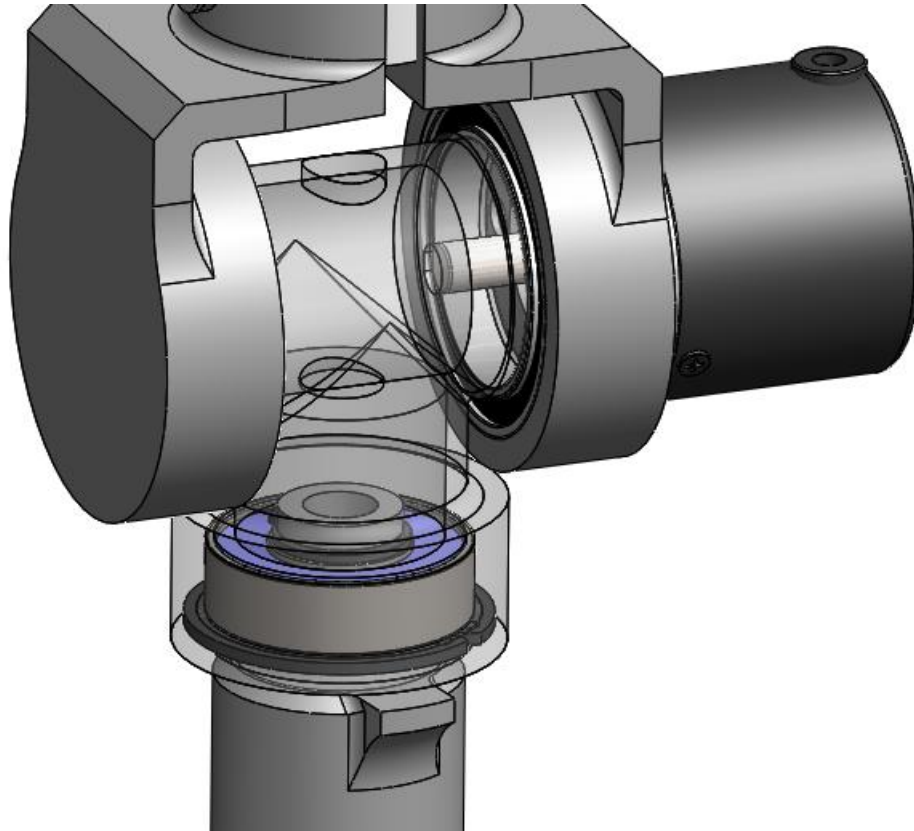


Fig. 32 Detalls constructius de l'articulació E

2.3.2. Manipulador i sistema d'adquisició de punts (SAP)

En l'esbós de l'alternativa inicial de disseny de la que parteix el desenvolupament del braç de mesura projectat, es pot visualitzar un SAP muntat junt a un manipulador que incorpora un mànec ergonòmic i una articulació pròpia, sense encòder òptic; aquesta és la configuració i muntatge que acostumen a incorporar els models comercials. En la realitat, el SAP projectat distarà notablement del presentat en la idea de disseny inicial a causa de les especificacions que cal satisfer per possibilitar el correcte funcionament del braç articulat. Igualment, no s'ha de passar per alt el fet que el SAP, junt al manipulador o capsal, és una de les peces claus en el funcionament d'un BAMC i el seu disseny afectarà inevitablement la qualitat i la precisió de les mesures efectuades.

2.3.2.1. Especificacions generals del manipulador

El SAP (manipulador) que es presenta en el disseny final del BAMC ha de presentar una sèrie de característiques que en permetran la seva implementació i utilització sense crear situacions conflictives que redueixin el rendiment i la funcionalitat del braç. Les particularitats més destacades es recullen en aquest apartat:

1. Compacte i mínima massa

Tant el manipulador com el SAP són els dos darrers elements o membres de la cadena cinemàtica formada pel braç de mesura. Això implica que un excés de massa o de volum constructiu generaria esforços innecessaris en totes les articulacions del braç que anirien incrementant-se per l'acció de la distància; així doncs, la base i les properes serien les peces més sol·licitades.

2. SAP per contacte

D'entre les diferents tipologies de SAP exposats en l'apartat 1.3.2. *Màquines de mesura per coord. no cartesianes*, en aquest projecte s'ha optat per l'opció més senzilla i conservadora, que implica la utilització de menys parts funcionals i mòbils, cap tecnologia de precisió i un menor manteniment a curt i llarg termini. Per aquests motius, i seguint amb la dinàmica simplificadora, el sistema utilitzat serà el d'un SAP per contacte (palpador), passiu i de punta viva que anirà incorporat en la pròpia geometria del manipulador.

3. Accessibilitat i comoditat

A banda de les funcions de posicionament del punt geomètric a mesurar-ne la posició, el SAP s'inclou en el conjunt general del manipulador. Per tant, el manipulador ha de permetre una utilització còmode així com una bona subjecció o adherència en la mà de l'usuari. Sense anar més enllà, ha d'incloure les consideracions bàsiques i mínimes del concepte d'ergonomia. Tot i que l'opció d'incorporar un mànec soluciona, a priori, aquestes implicacions, la seva presència pot dificultar l'accés en algunes parts de peces geomètricament complexes. Igualment, contribuiria a augmentar els paràmetres de volum constructiu i de massa. Amb aquesta funció en ment, sí que es mantindrà l'articulació pròpia del manipulador, però se n'ha de canviar el disseny exterior.

4. Controlador del procés de mesura

Una última funcionalitat que ha d'incorporar el manipulador és la d'un botó o accionador a l'abast dels dits de la mà de l'usuari per poder controlar el procés de mesura sense haver d'interferir directament sobre el microcontrolador més enllà de l'engegada i la preparació de l'aparell de mesura. Alhora, també es pot incloure un sistema de menús en el microcontrolador que permeti a l'usuari saber en quina etapa del procediment de mesura es troba i com ha d'actuar en cada moment visualitzant les instruccions exposades en la pantalla del microcontrolador.

2.3.2.2. Disseny del manipulador

En termes constructius, el manipulador final presenta una forma tubular llisa, amb un diàmetre de 30 mm, adaptable i còmode per una gran varietat de mans permeten una subjecció ferma i segura.

Aquest disseny permet unes dimensions molt compactes (80 mm de longitud útil) i una geometria majoritàriament buida que permet la instal·lació d'un botó de control necessari per al control del procediment de mesura. L'assoliment d'aquesta geometria complexa ha estat possibilitat per la utilització del procés de fabricació d'impressió 3D per modelat per deposició fosa, junt amb el PLA com a material constitutiu principal. Es preveu la instal·lació d'un botó metàl·lic de simple efecte i amb retorn automàtic a l'abast del dit polze, en la part superior del manipulador, amb el que l'usuari podrà donar inici al procés de mesura un cop engegat l'aparell. El cablejat d'aquests elements passarà a través de l'interior del manipulador i directament cap a l'interior del segment d'estructura tubular més pròxim.

Per altra banda, el SAP projectat és un SAP per contacte, també conegut com palpador. Aquest requereix d'incidència o intersecció física directa entre la superfície a tractar i el sistema per posicionar un punt i enregistrar la coordenada desitjada.

D'entre les dues grans variants de palpadors es tracta d'un SAP passiu, també denominat fixe. Per mitjà d'aquest, l'estat o posició (punt) en el que el palpador està en una relació d'incidència a la superfície a mesurar es valida, és a dir, se'n registren les coordenades, sota la indicació de l'usuari per mitjà d'un accionador o sistema similar. Per això, s'acostumen a utilitzar exclusivament en MMC

manuals amb les que l'usuari posa en contacte la sonda amb la peça en la posició que més convingui, espera que l'aparell s'estabilitzi i es registra la seva posició. Es tracta d'un sistema en llaç obert la realimentació del qual la realitza l'operador. És a dir, és la tipologia de SAP idònia per al BAMC projectat.

Més concretament, es tracta d'un palpador passiu de punta viva, ja incorporat per les primeres màquines de mesura en forma de lectors mecànics de coordenades amb un punter. L'aspecte positiu d'aquest tipus de palpador és la seva capacitat per localitzar punts reals sobre les superfícies treballades degut a que no compten amb cap tipus de radi o arrodoniment (a gran escala) en el seu extrem. El seu ús exclusivament manual el fan un palpador poc productiu però molt adient per mesurar petits orificis, perfils roscats o geometries complexes. Contràriament, l'alteració de la punta degut al desgast per fricció o a un mal ús augmenta la possibilitat d'error en la mesura. Sobretot en els casos, com aquest, en el que al SAP es forma del mateix material que la resta del manipulador, a partir d'una punta cònica de dimensions conegudes en un dels seus extrems. Per reduir aquest desgast i augmentar la precisió d'assignació de punts en la mesura, s'ha inclòs un punter metàl·lic

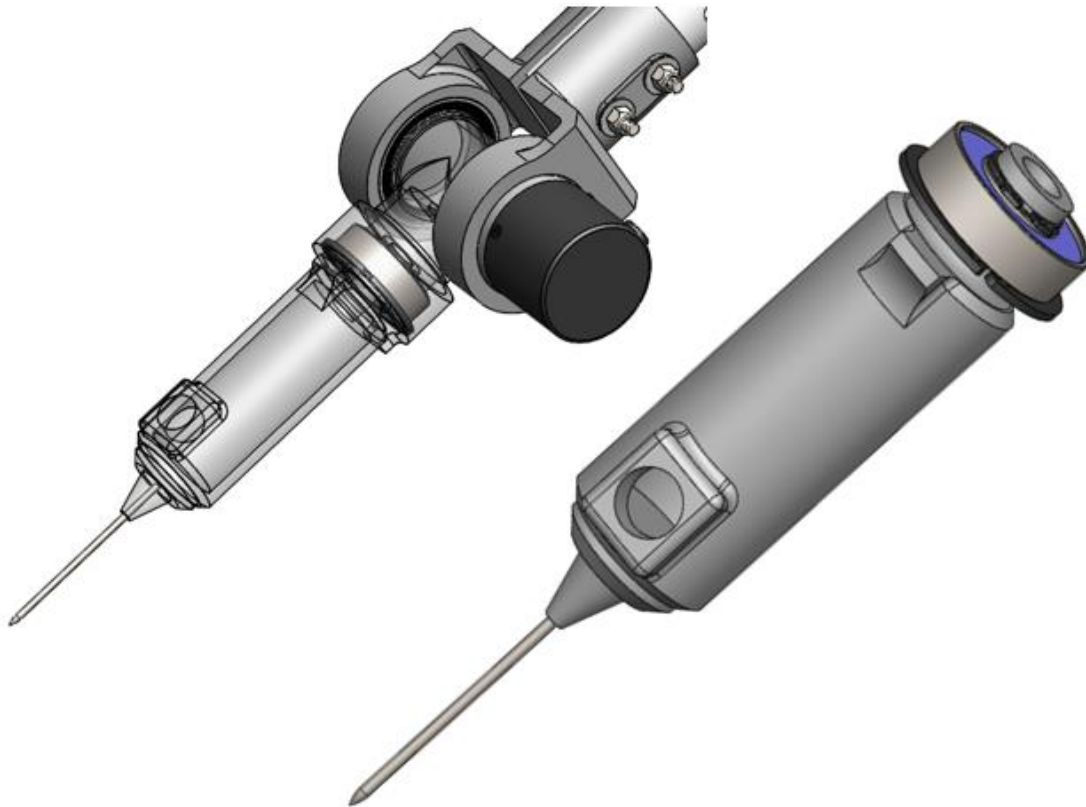


Fig. 33 Detalls i vistes del manipulador (SAP)

com a punt de contacte entre el SAP i la peça a mesurar.

Finalment, cal incorporar al manipulador un eix de diàmetre conegut i amb les corresponents ranures de fixació per mitjà d'anell *Seeger* per a poder-lo acoblar en l'articulació E. D'aquesta manera es dotarà d'encara més llibertat de moviment i accessibilitat a l'hora de realitzar mesures; així es permet a l'usuari rotar l'articulació del canell durant la manipulació del BAMC sense deixar de subjectar de forma ferma el palpador amb la mà.

2.3.3. Estructura tubular

Els diversos elements estructurals i funcionals dels que se n'han exposat els detalls constructius fins ara, per sí sols, no poden conformar la totalitat del braç articulat de mesura projectat. Aquests components es relacionen en el muntatge entre si a través d'una estructura homogènia tubular i continua que esdevé el braç en si. Per motius de conveniència, sobretot relacionats amb l'abaratiment de costos i en la simplificació dels processos constructius, s'ha optat per utilitzar segments de canonada polimèrica comercials, destinats habitualment a instal·lacions de fontaneria i electricitat domèstiques. Concretament, i com ja s'indica en l'apartat 1.6. *Estudi de materials*, es farà ús de toveres de PVC de diàmetre exterior de 32 mm, i un diàmetre interior de 28,4 mm, fabricades per la marca comercial JSL.

2.3.3.1. Especificacions generals

La forma final de l'estructura tubular, així com el material utilitzat i les operacions de mecanitzat que s'hi realitzen per conformar la segons gran part funcional i estructural del braç de mesura, té una sèrie de peculiaritats o característiques enfocades a assolir els objectius plantejats inicialment en aquesta memòria. És a dir, el fet que s'utilitzin segments tubulars buits té diverses raons de ser, cadascuna més important que l'anterior, per assegurar el correcte funcionament del BAMC. Aquestes implicacions es recullen i exposen breument en el següent apartat, el que ajudarà a entendre els motius i les idees que hi ha rere el disseny final.

1. Funció estructural i resistència a la flexió

Els tubs comercials de PVC elegits presenten una notable resistència a la flexió enfront les sol·licitacions i la funció de suport de la resta de components i peces que conformen el muntatge del braç de mesura. Aquesta característica resulta indispensable per poden obtenir mesures precises, amb un error mínim.

2. Comunicació entre components electrònics

El format tubular, amb una secció majoritàriament buida, permet passar el cablejat dels components electrònics de forma discreta i ordenada a través seu a través de diversos orificis d'entrada i sortida. Així doncs, es possibilita la connexió per cable entre els diferents elements funcionals sense comprometre de forma desmesurada l'estètica exterior i la mobilitat del propi braç articulat.

3. Augment del VUT

Per la pròpia naturalesa resistent dels tubs de PVC, ja mencionada en el primer punt, per mitjà de només dos segments diferenciats es possibilita la implementació d'un VUT considerable sense necessitat d'incloure peces fabricades o dissenyades des de zero. Això permet muntar un prototip de BAMC de gran abast, capaç d'efectuar mesures en punts distanciatos o en peces de dimensions destacables.

4. Alleugeriment de volum constructiu i de massa

El mateix motiu anterior implica la reducció de peces fabricades en impressió 3D (FDM) les dimensions (volums constructiu i massa) de les quals haurien de ser superiors a les presentades pel tub de PVC per poder resistir les mateixes sol·licitacions. Això provoca que la massa del còmput global de peces del conjunt es vegi enormement reduïda, augmentat la comoditat de l'usuari a l'hora d'efectuar mesures i de manipular el braç articulat. Igualment, aquesta situació causa una reducció

de les sol·licitacions que experimenten les pròpies peces a causa de les components de pes propi, el que, en certa manera, realimenta aquesta reducció de dimensions.

5. Minimització de processos

L'ús d'un element ja comercialitzat de forma íntegra, com és el cas dels tubs de PVC, provoca una reducció en processos de fabricació necessaris per a obtenir peces que es puguin integrar en el disseny de braç de mesura projectat. Donat que la part de conformació de l'estructura tubular és tasca del fabricant o proveïdor, els processos de fabricació implicats en l'abast d'aquest projecte es limiten a procediments senzills de mecanitzat, de tall i trepanat, sobretot.

6. Reducció de costos

A causa d'una reducció de la necessitat de materials i processos de fabricació així com d'altres accions per poder implementar un element comercial, com són els tubs de PVC, al disseny del BAMC, la totalitat de costos econòmics implicats en aquesta secció del projecte es veu substancialment reduïda.

7. Accessibilitat i sostenibilitat

Des del punt de vista de l'accessibilitat i la sostenibilitat, el PVC és un material polimèric àmpliament utilitzat arreu del món per aplicacions diverses el que en facilita la seva presència en qualsevol àmbit comercial industrial en distribuïdors de tipologia i mida diversa; aquesta utilitat en propicia un costos d'obtenció molt reduïts així com una major viabilitat de reciclatge. De fet, essent el PVC un termoplàstic, és dels pocs polímers que són susceptibles a ser reciclats per mitjà de processos tèrmics. Finalment, a nivell de conveniència econòmica esdevé una opció molt assequible, ja fabricada i que requereix d'accions de mecanitzat mínimes per a poder ser implementat.

2.3.3.2. Disseny de l'estructura tubular

Tot i que els procediments aplicats sobre el format tubular de PVC comercial són relativament senzills, convé definir-los de forma detallada per facilitar la comprensió dels motius que han provocat aquesta configuració de disseny definitiva.

Bàsicament, s'ha optat per tallar dos segments tubulars de longituds diferenciades (426 i 519 mm) i perforar-hi una sèrie d'orificis la funció dels quals és la de permetre l'acoblament amb les peces que formen algunes de les articulacions, així com permetre l'entrada i la sortida del cablejat. A cadascun dels extrems de cada segment s'ha projectat l'existència d'un parell de forats equidistants (12 mm) separats 14 mm de la superfície de l'extrem, de 4 mm de diàmetre i passants; aquests van destinats a poder utilitzar cargols M4 ($\varnothing 3,91$ mm) en la fixació entre el segment tubular i l'articulació prèvia o següent en la cadena cinemàtica que forma el BAMC.

Alhora, per al pas del cablejat, s'han generat una sèrie d'orificis de 6 mm de diàmetre (1 per cada extrem), que només travessen la paret tubular per un punt i es situen en el mateix pla, o el pla perpendicular a les perforacions anteriors. Tots ells es distancien 60 mm des de cada extrem tubular.

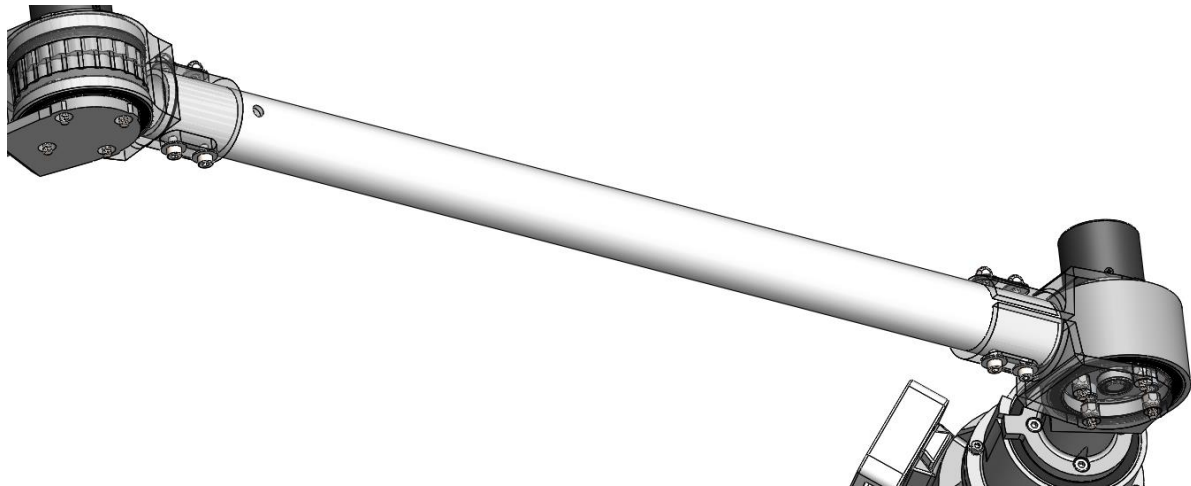


Fig. 34 Vista detallada d'un dels segments tubulars (B - C)

2.3.4. Base

La base és la peça a partir de la qual es desenvolupa tot el muntatge del braç articulat de mesura. És l'element que permet la fixació del BAMC a la bancada cinemàtica i assegura l'estabilitat de la totalitat de l'aparell durant la realització dels diferents moviments per tal de poder adquirir les mesures desitjades. Alhora, també permet la fixació del microcontrolador elegit per al control del programa de mesura per mitjà del sistema d'acoblament exposat en l'anterior subapartat.

2.3.4.1. Especificacions generals de la base

Seguint la dinàmica portada durant tot aquest apartat, per definir el disseny de la base es farà incís en les característiques clau buscades i en les peculiaritats constructives introduïdes per materialitzar-les. En termes generals, les directrius de disseny són les següents durant el desenvolupament de qualsevol dels altres elements modulars del BAMC.

1. Suport i estabilitat

La base és la única unió entre la superfície de treball i el cos del BAMC. Així doncs, esdevé l'únic punt de recolzament i suport fixe del braç. Per això ha d'assegurar l'estabilitat estructural de tot l'aparell durant el procés de mesura així com la subjecció a la bancada. L'esmoreïment de possibles vibracions excessives i de moviments no desitjats implica un augment considerable de la precisió en les mesures realitzades així com una major comoditat per l'usuari durant la manipulació. Així doncs, la base ha de permetre l'acollament per mitjà d'algun sistema semi-permanent a la superfície de treball.

2. Resistència

Donat que a la base suportarà o transmetrà les reaccions i els moments generats per la totalitat del braç durant el seu ús, cal que disposi de l'estructuració adient per aguantar-los sense trencar-se o deformar-se. Així doncs, convé que el dimensionament d'aquest mòdul constructiu es trobi per sobre dels límits requerits.

3. Maniobrabilitat articular

A l'interior de la base s'hi allotjarà tant el sistema d'augment de resolució cicloidal (multiplicador mecànic) com el propi encòder òptic de l'articulació paral·lela inicial (A). Així doncs, convé que l'estructura estigui majoritàriament buida o que, al menys, disposi del suficient espai interior com per contenir aquests elements. Tanmateix també s'ha de tenir en compte el recorregut total possible del cablejat de l'encòder.

Per altra banda, la base en sí no pot implicar un detriment del VUT del braç de mesura; és a dir, les dimensions totals de la base no poden afectar a la mobilitat global del BAMC.

2.3.4.2. Disseny de la base

Tenint en compte les prestacions buscades en el disseny de la base del braç de mesura, s'ha desenvolupat una base cilíndrica buida, amb una sèrie de reforços estructurals molt visibles. Aquesta permetrà la fixació del BAMC sobre una superfície de treball tot incorporant el sistema d'acoblament del microcontrolador i contenint el mecanisme multiplicador i l'encòder òptic de l'articulació paral·lela A.

La base es forma per un primer anell on es disposen repartits uniformement els orificis de 5 mm de diàmetre destinats a la fixació del braç a la superfície de treball amb cargols roscats. La part inferior d'aquesta cara inicial de contacte s'estén radialment cap a l'interior de la base per augmentar la superfície. A sobre d'aquest nivell es construeix la totalitat del cos cilíndric buit de la base, amb la ranura del sistema d'acoblament del microcontrolador en la part exterior (veure apartat 2.3.5. *Sistema d'acoblament del microcontrolador*). Per la part superior de la base es disposa la zona d'acoblament del cos exterior de l'articulació A, que es subjectarà per mitjà també d'una sèrie d'orificis passants de 3 mm de diàmetre per introduir cargols roscats (M3) amb les seves respectives femelles hexagonals. En aquesta part, degut a la presència de superfícies en voladís, s'han dissenyat una sèrie de nervis de 3 mm de gruix disposats radialment per donar suport i resistència a la unió entre ambdues peces esmentades. Per reduir la concentració de tensions, tots els canvis de diàmetre i les interseccions superficials van acompanyats d'arrodoniments majoritàriament, o xamfrans en els casos que es requereix un augment del gruix de material disponible.

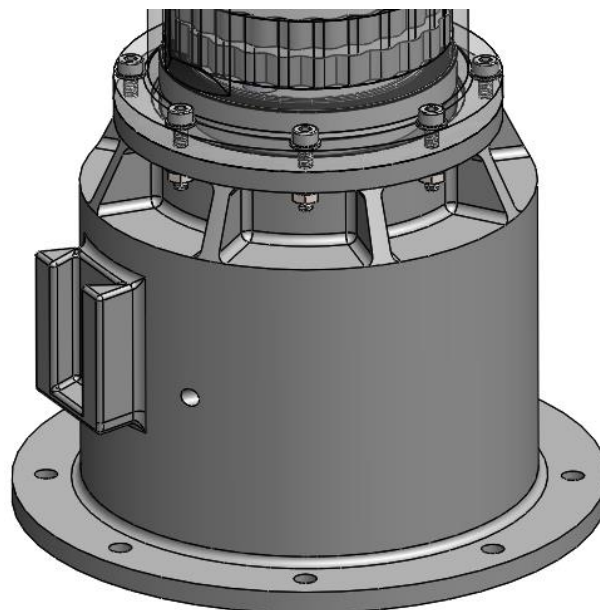


Fig. 35 Detall de la base del BAMC

2.3.5. Sistema d'acoblament del microcontrolador

Tal i com es veurà en els següents apartats, el funcionament i el procés de càlcul necessari per a la determinació de la posició del SAP es determina gràcies a l'acció d'un microcontrolador, concretament el *M5Stack Core2*; aquest és l'encarregat de guardar i executar el software de mesura. Tanmateix, es tracta d'una unitat comercial totalment separada i aliena al muntatge en sí del BAMC, al que s'hi uneix per mitjà d'una sèrie de connexions per cable. A fi d'assegurar-ne la subjecció i l'estabilitat durant el procediment de mesura, s'ha dissenyat un sistema d'acoblament modular basat en les carcasses dels telèfons mòbils actuals.

2.3.5.1. Especificacions generals del sistema d'acoblament del microcontrolador

El disseny del sistema d'acoblament del microcontrolador té una importància destacable a dintre del còmput global d'elements que formen el BAMC; de l'estabilitat i la seguretat de la subjecció en depenen la integritat del propi controlador i la de les connexions entre aquest últim i els elements de mesura i control que possibiliten el procés de mesura. Així doncs, el format final d'aquest sistema ha de reunir una sèrie de característiques i especificacions concretes.

1. Flexibilitat i protecció

El sistema ha de contenir una estructura que subjecti i protegeixi la totalitat del cos del microcontrolador però que alhora sigui fàcil d'instal·lar-se. És a dir, el microcontrolador s'hi ha de poder acoblar i desacoblar ràpidament però sense danyar-se.

2. Modular

El sistema de subjecció ha de ser mòbil, és a dir, no pot estar fixat al cos del BAMC de forma permanent; el microcontrolador i les seves connexions han de poder desplaçar-se, en certa mesura, respecte de la posició de muntatge. Alhora i si és possible, cal evitar sistemes de fixació semi-permanents que requereixin d'un procediment específic d'instal·lació (cargols, brides, etc.). Cal donar-li un enfocament més dinàmic sense perdre estabilitat ni seguretat en la subjecció.

3. Accessibilitat per l'usuari

El sistema dissenyat no ha de representar un impediment a l'hora de la instal·lació, de l'acoblament del microcontrolador o de la manipulació dels botons o controls del mateix. Alhora, la seva ubicació no pot limitar la llibertat de moviments del propi braç de mesura (VUT).

Per altra banda, cal que sigui un conjunt simple i que no doni peu a cometre errors que puguin malmetre les connexions entre el BAMC i l'aparell.

4. Estabilitat

Juntament amb la resta de característiques, el sistema d'acoblament ha de disposar d'una estabilitat notable, és a dir, d'una relativa rigidesa. El microcontrolador no s'ha de desacoblar degut als moviments que pugui efectuar el BAMC durant el procediment de mesura, i s'ha d'assegurar la permanència de les connexions en tot moment.

2.3.5.2. Disseny del sistema d'acoblament del microcontrolador

A fi de complir amb les especificacions anteriorment detallades, s'ha basat el disseny del sistema d'acoblament del microcontrolador en les carcasses de protecció dels telèfons mòbils actuals. Amb això, s'ha optat per combinar una carcassa de protecció flexible que encapsula el microcontrolador i que s'uneix al cos del BAMC per mitjà d'un sistema de ranures.

A partir de l'observació de diversos exemples dels esmentats elements de protecció de telefonia mòbil, s'ha determinat que es fabriquen en materials polimèrics tals com silicones, acrílonitril-butadiè-estirè (ABS) o policarbonat (PC), sobretot. Alhora, els seus gruixos oscil·len entre els 1,5 i els 2 mm, arribant fins als 3 mm en casos de proteccions d'alta resistència a impactes. A partir de les anotacions anteriors, i seguint amb la dinàmica de fabricació per impressió 3D (FDM), s'ha dissenyat una carcassa flexible de 2 mm de gruix constant al voltant del microcontrolador que es conformarà per mitjà de filament de poliuretà termoplàstic (TPU).

Per altra banda, en termes d'accessibilitat en les connexions o els elements de control externs dels telèfons mòbils, les carcasses protectores comercials o bé deixen una cavitat buida o bé incorporen sistemes flexibles d'accionament. En el cas del sistema d'acoblament del microcontrolador, s'ha optat per deixar les cavitats necessàries al voltant del cos de la carcassa en funció de la disposició dels elements de control externs, o dels ports de connexió.

Pel que fa a la subjecció de la carcassa del microcontrolador al cos del BAMC, s'ha incorporat una unió basada en una ranura de cua de milà (trapezoidal) amb inserció per la cara superior. Aquest sistema de subjecció semi-permanent no requereix d'elements auxiliars i compta amb un procés d'acoblament i desacoblament molt simplificat. Alhora, permet el contacte d'una gran quantitat de superfície entre el cos del braç de mesura i la carcassa protectora del microcontrolador; això implica una subjecció rígida, estable i resistent. En aquest cas, la ranura és implícita al cos de la base del BAMC, mentre que la guia o mascle està unit al revers de la carcassa del microcontrolador.

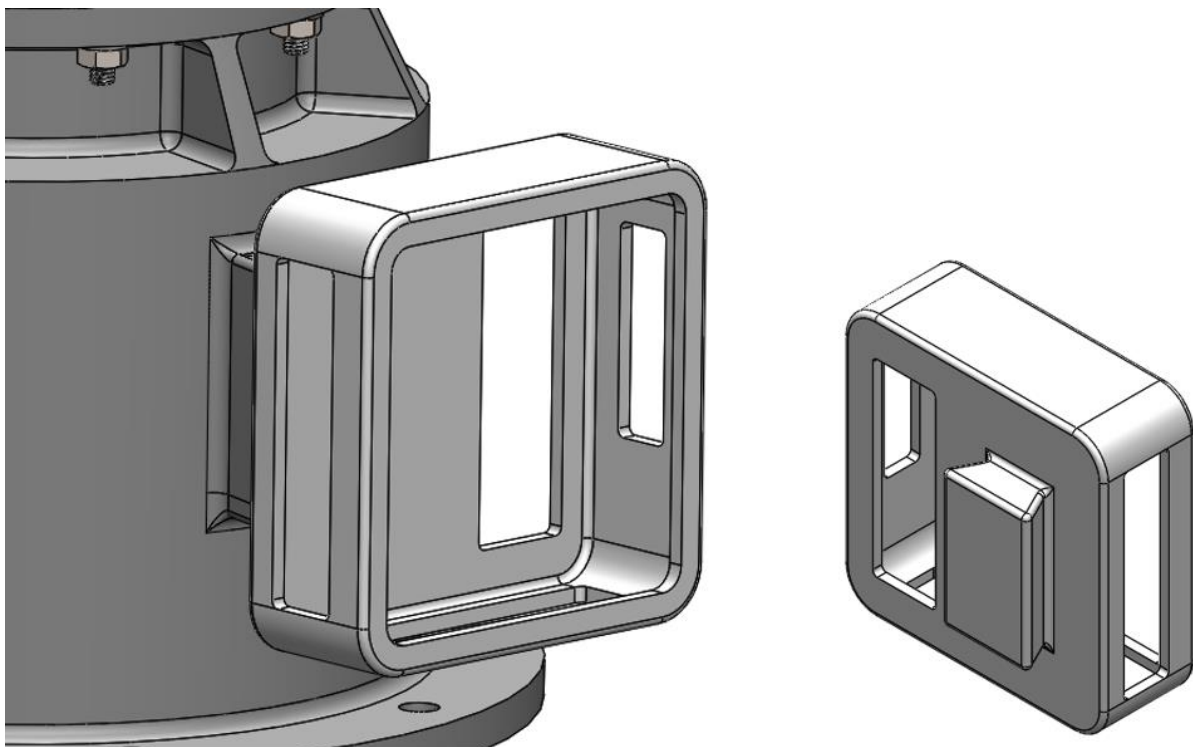


Fig. 36 Detalls constructius de la carcassa del microcontrolador

2.4. Disseny modular electrònic

La segona gran vessant que compona el BAMC és el conjunt d'elements electrònics funcionals que permeten l'adquisició de dades i el processament d'aquestes per assignar les coordenades corresponents a cada punt mesurat. Aquest conjunt es forma bàsicament per 3 grans grups funcionals, i un seguit d'elements auxiliars comuns o encarregats de connectar els principals entre ells.

- a. **Microcontrolador:** és l'aparell encarregat d'emmagatzemar i executar el software de mesura coordinant les accions de la resta d'aparells electrònics; interpreta i aplica les decisions de l'usuari, recull i selecciona les dades recaptades i les processa per obtenir la mesura desitjada.
- b. **Encòders òptics:** són els elements electrònics encarregats de mesurar el desplaçament angular a les articulacions A, B, C i D a partir del que es deduirà la posició final del palpador.
- c. **Elements de control:** són els components funcionals destinats a vincular l'acció i les decisions de l'usuari amb el funcionament del BAMC. És a dir, possibiliten el control del braç per part de l'operador.

En aquest apartat es recullen les especificacions, la funció i la distribució envers l'estructura del braç de mesura d'aquests components. Alhora, també s'exposa la disposició i el circuit muntat per possibilitar el funcionament coordinat de tots els elements.

2.4.1. Microcontrolador

Un microcontrolador es compona per un circuit integrat programable, capaç d'executar instruccions (programes) gravats en la memòria interna que incorpora gràcies a l'acció d'un microxip. A diferència d'un microprocessador, els microcontroladors estan ideats per funcionar amb autonomia, sense l'ajuda de cap element perifèric. Per això, ja incorpora una sèrie de prestacions i components (pantalla LCD, bateria, connectors, etc.) que en permeten la independència funcional. En el present projecte, el microcontrolador desenvolupa un paper protagonista en el procés de mesura i en el funcionament del BAMC. És l'element encarregat de fer córrer el software de mesura que, a partir de les dades recollides en la resta d'elements electrònics, i per mitjà del control i la supervisió de l'usuari, permetrà obtenir la posició espacial d'un punt concret.

Per al desenvolupament d'aquest projecte s'ha optat per utilitzar el microcontrolador *M5Stack Core2*, desenvolupat per la marca comercial electrònica *M5Stack*. Aquest és el dispositiu bàsic de segona generació de la sèrie de kits *Core2*. Incorpora el microxip de processament *ESP32-D0WDQ6-V3*, amb processadors *LX6 Xtensa* de 240 MHz de doble nucli, amb possibilitats d'operar-se per separat, 520 kB de *SRAM* i connexió *WI-FI* i *Bluetooth* incorporades.

També presenta una interfície de connexió *USB* de tipus *C* per a la càrrega, descàrrega de programes i comunicació en sèrie, ranura per targetes *microSD*, una pantalla tàctil capacitiva integrada (*LCD*) de 2 polzades, altaveus amb xip amplificador de potència i un motor de vibració integrat.

L'*M5Core2* també inclou un mòdul *RTC* integrat que pot proporcionar un temps intern precís. La font d'alimentació està gestionada per un xip de gestió d'energia *AXP192*, que pot controlar eficaçment el consum d'energia de la base i un indicador d'alimentació *LED* verd integrat per notificar a l'usuari el nivell de la bateria. La capacitat d'aquesta s'ha augmentat fins als 390 mAh i està construïda en base a polímers d'ions de liti (*LiPo*), proporcionant una autonomia molt més duradora i la capacitat de fer-lo funcionar sense necessitat de connexió. Pel seu maneig, disposa de botons d'engageda i

restabliment independents al costat esquerre i inferior de la base. Alhora, les tres icones de la part frontal de la pantalla són botons capacitius programables. També hi ha una petita placa d'expansió a la part posterior de la base amb un sensor *IMU* de 6 eixos, per detectar acceleració i orientació espacial i un micròfon.

Una de les avantatges més destacables és que l'*M5Core2* és compatible diferents plataformes de desenvolupament i llenguatges de programació; en aquest projecte s'optarà per l'entorn de programació *Arduino*.

En termes de pins de connexió, incorpora entre les entrades i sortides de la part posterior i lateral 48 pins; d'aquests, 14 són pins analògics i 26 són digitals. Els 8 pins restants esdevenen pins de subministrament de potència.

Cal destacar que totes aquestes funcionalitats, d'entre moltes altres, venen encapsulades a dintre d'una carcassa de policarbonat pigmentat de 54x54x16 mm i tan sols 52 g. Alhora, el seu preu de venda al mercat també resulta molt convenient, no superant els 50€/unitat.

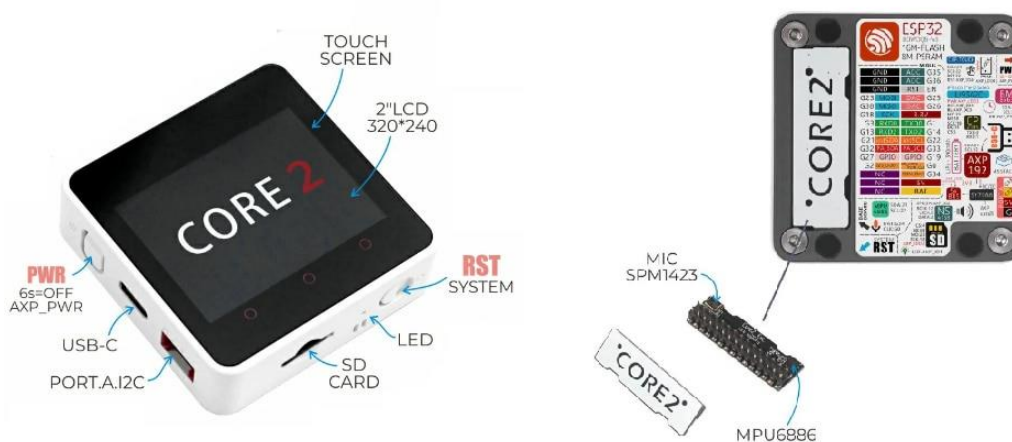


Fig. 37 Microcontrolador *M5Core2* amb algunes de les seves propietats indicades

2.4.2. Encòder òptic

Els encòders òptics, junt amb el mecanisme cicloidal, són el principi funcional del braç de mesura; són els components electrònics principals en la construcció i el funcionament del BAMC. La seva acció permet mesurar el desplaçament angular de les articulacions i, conseqüentment, possibilita calcular la posició final del palpador. Donat que el funcionament i el seu principi tecnològic ja s'han exposat en l'apartat 1.3.3. *Mecanisme cicloidal*, ara es repassaran les prestacions i els detalls constructius dels encòders utilitzats en el desenvolupament del present projecte.

En el braç de mesura dissenyat es preveu la disposició de 4 encòders òptics, un a cadascuna de les articulacions A, B, C i D. En l'articulació A, l'encòder es troba ocult en l'interior de la cavitat formada entre el cos de l'articulació i la base, en paral·lel a l'eix del parell de revolució i dels elements que relaciona. Pel contrari, els tres restants (B, C i D) es situen de forma externa i concèntrica amb l'eix de rotació de cada parell de revolució. Cadascun dels encòders anirà collat solidàriament amb l'eix central (eix excèntric) de les articulacions. En el cas de les articulacions A, B i C projectades, donat que el mecanisme cicloidal que incorporen és un mecanisme multiplicador, augmentarà la precisió en la mesura de l'angle en el factor de la relació de transmissió del mecanisme. Pel contrari, l'articulació D és simple, sense mecanisme que alteri la relació de transmissió; per tant, l'encòder anirà acoblat directament a l'eix central del parell de revolució. En qualsevol cas, la unió solidària entre eixos es dona sempre per encaix de la forma exterior de l'eix de l'encòder amb la cavitat

central de l'eix articular, disposant de formes semicirculars complementàries amb un rebaix pla per evitar la rotació relativa.

Tot i la unió de l'eix, que podrà girar solidàriament amb el moviment de les articulacions, la carcassa exterior o cos de l'encòder anirà fixada a la part exterior de les articulacions per mitjà de 3 cargols de DIN 912 M3x12. Aquests cargols es fixaran per la part interior del mecanisme cicloidal.



Fig. 38 Encòder òptic LPD3806-600B-G5-24N

Per altra banda, els encòders utilitzats són el model de producció asiàtica *LPD3806-600B-G5-24N* comercialitzats a través de la marca *GTEACH*; aquests aparells són de tipus incremental fotoelèctric (òptic) i compten amb 2 canals de sortida (doble circumferència de 150 ranures al disc). Totes les seves prestacions esmentades a continuació venen recollides en la pròpia nomenclatura de l'element electrònic. Donat que aquests encòders disposen de dues senyals digitals de sortida s'utilitzaran en quadratura, augmentant-ne la precisió de mesura fins a les 600 divisions per revolució (P/R). Tot i disposar d'unes prestacions considerables, les dimensions totals de l'encòder no superen els 38 mm de diàmetre exterior i els 53 mm de longitud total; l'eix de rotació compta amb un diàmetre de 6 mm per 13 mm de llarg, amb una cara

rebaixada fins als 5,4 mm de 10 mm longitudinals. Pel que fa a la massa, no supera els 160 g. En termes de cost econòmic, el seu preu ronda els 20 €/unitat.

En termes de connexió, l'encòder disposa de 4 terminals (cables) diferents. Els de recobriment de color verd i blanc són els terminals de sortida de les dues senyals digitals (A i B) que contenen la informació de l'angle rotat; el de color negre és la presa a terra (*GND*); finalment, el terminal de color vermell és el d'alimentació, que ha de subministrar 5V a l'encòder per fer-lo funcionar. Així mateix, incorpora un cinquè cable sense recobriment que funciona com a segona presa a terra i la connexió del qual no és necessària.

2.4.3. Elements de control

Els elements de control possibiliten la generació d'una interfície d'interacció entre l'usuari i el propi BAMC durant el procés de mesura. Permeten que l'operador del braç manipuli i governi l'aparell per assolir les coordenades i mesures desitjades. Aquests elements de control són bàsicament un pulsador incorporat al SAP i la pròpia pantalla *LCD* del microcontrolador.

a. Botó pulsador

A banda del propi microcontrolador, l'únic accés possible al software de mesura per a la interacció amb el BAMC que té l'usuari, a part del propi microcontrolador, és un botó interruptor localitzat en el propi mànec del SAP, del palpador. És tracta d'un pulsador de simple efecte i amb retorn automàtic instantani (normalment obert) de la marca fabricant *GUUZI*. Permet corrents de fins a 3 A i 250 V. Alhora, està fabricat en metall (llautó niquelat) i és impermeable (protecció IP65). De forma cilíndrica, té un diàmetre de 12 mm i una longitud total de 21 mm i la seva fixació es realitza per mitjà d'una rosca longitudinal a tot el seu cos.

El pulsador permet elegir el programa o software de mesura a executar i iniciar el propi procediment de mesura un cop s'ha determinat el punt geomètric d'interès per mitjà del SAP.

b. Pantalla LCD

Com ja s'ha vist, el microcontrolador incorpora una pantalla LCD tàctil amb una resolució de 320x280 píxels. En ella s'hi pot projectar tot tipus de caràcters i il·lustracions utilitzant els píxels verticals i horitzontals en conjunts dos a dos com a coordenades per a situar els elements mostrats per pantalla. Per mitjà d'aquest element es mostrarà un menú que funcionarà com interfície d'interacció entre l'usuari i el propi BAMC. La funció d'aquest és la de permetre a l'operari seleccionar el tipus de procediment que vol portar a terme. Alhora, ha d'informar-lo en temps real del desenvolupament del procés de mesura i de les instruccions que ha de seguir per obtenir les coordenades o mesures desitjades sense alteracions. L'elaboració íntegra del format del menú del programa

Com no pot ser d'altra manera, la pantalla es troba annexada sobre la superfície visible del microcontrolador, per la cara que queda descoberta i a la part frontal envers el sistema d'acoblament modular del mateix amb la base del braç. Així doncs, l'accés i la interacció serà accessible per l'usuari abans i durant la utilització del BAMC.

2.4.4. Connexions entre components

Un cop vists els components electrònics funcionals dels que disposa el BAMC, cal determinar com es distribueixen al llarg del braç i de quina forma es comuniquen entre si. El muntatge del circuit en si resulta determinant per assolir un bon funcionament durant el procés de mesura. Per observar l'esquema general del circuit electrònic cap avançar fins l'apartat (4.7. Esquema del muntatge electrònic).

2.4.4.1. Connexió pulsador – microcontrolador

El pulsador instal·lat en el manipulador del SAP serveix per a que l'usuari pugui iniciar l'adquisició d'un nou punt o per a sortir del procés de mesura, tal i com es veurà en l'apartat següent. En qualsevol cas, com un interruptor genèric que és, de tipus normalment obert, cal connectar-lo al microcontrolador d'una forma específica. El microcontrolador serà l'encarregat de comprovar l'estat del pulsador i d'executar les instruccions del software de mesura pertinents quan aquest estat canviï.

Per la connexió del pulsador s'utilitzarà el sistema de resistència *Pull-Down*. Aquest muntatge es basa en situar una resistència de magnitud determinada entre un pin digital d'entrada (G2) del microcontrolador i la connexió a terra (*GND*) del mateix. Alhora, el pulsador es col·locarà entre el pin de sortida de tensió (+5V) i el pin digital d'entrada seleccionat.

El valor de la resistència a escollir ve condicionat per la intensitat que passa en accionar el pulsador, i per un concepte anomenat autoritat del *Pull-Down*, estretament relacionat amb el soroll en el mesurament de la senyal. Una resistència molt petita, tindrà molta autoritat, però permetrà el pas d'un corrent més gran, fet que suposa més consum i més escalfament en la resistència i els aparells implicats. Una resistència molt gran, deixarà passar poc corrent, però tindrà poca autoritat, per la qual cosa serà més susceptible a mesuraments incorrectes deguts a soroll. En aquest cas s'ha optat per fer ús d'una resistència de reduïda resistivitat (1k Ω) en vistes d'assegurar l'autoritat i la correcta interpretació dels senyals. Alhora, aquest nivell de resistivitat permet controlar el pas de corrent sense generar una excessiva producció de calor per efecte Joule.

La resistència *Pull-Down* s'encarrega de mantenir el pin d'entrada (G2) a un nivell de tensió específic mentre no es premi el pulsador. Aquest nivell de tensió serà la referència a terra (0V). En paral·lel als bornes del pulsador també s'hi instal·larà un condensador de 1 μ F per reduir el

debounce (2.5.3.7. *Debounce*) i eliminar el soroll restant en el senyal. Aquest tipus de connexió s'oposa a la intuïció de connectar directament el pulsador entre un pin d'entrada digital i el pin de sortida de tensió. Si es fes això, mentre el circuit estés obert (pulsador no activat), el pin d'entrada quedaria totalment desconnectat de qualsevol tensió, assolint un estat d'alta impedància. En un microcontrolador, un estat d'alta impedància esdevé un estat indeterminat, un senyal que es pot interpretar com un valor qualsevol (obert o tancat indistintament). Igualment, tampoc es pot realitzar una doble connexió, unint el pin digital d'entrada amb el pin de terra, o el de sortida de tensió, i situant el pulsador en el pin restant; sense

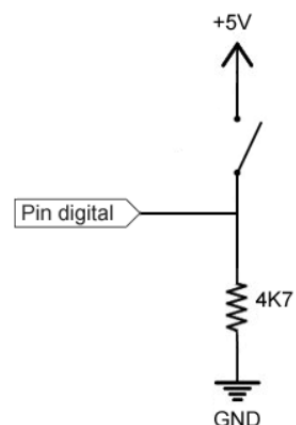


Fig. 39 Esquema de connexió de pulsador a entrada digital amb resistència Pull-Down

incorporar la resistència, això causaria un curtcircuit.

2.4.4.2. Connexió encòders – microcontrolador

La lectura de la posició del palpador del SAP, per part del microcontrolador, es realitza a partir de les dades de desplaçament angular recollides als 4 encòders òptics inclosos en les respectives articulacions. El model genèric d'encòder òptic utilitzat, el LPDC38S6GS-600B-G24N, disposa de dos canals de sortida (A i B). Tal i com es recull en l'apartat (3.1.3. *Components del circuit electrònic*), es podrà implementar en precisió quàdruple registrant ambdós flancs de gir per mitjà de d'entrades digitals diferents.

En termes de cablejat, els cables blanc i verd són, respectivament, els canals de sortida A i B; el cable negre és la connexió a terra; el cable vermell és l'entrada de tensió (alimentació) a l'encòder; hi ha un cinquè cable sense protecció, la funció del qual no té cap mena d'interès en el present projecte. Donat que hi ha 4 encòders disposats al llarg del braç de mesura, cal gestionar la connexió de 8 entrades digitals, 4 connexions a tensió d'alimentació (+5V) i 4 connexions a terra. En la taula adjunta es defineix aquesta distribució de pins envers el microcontrolador. Cal puntualitzar que totes les connexions a terra i a la font d'alimentació es realitzaran a través del mateix pin, connectant-se els encòders en paral·lel.

Articulació	Connexions	Pin M5Core2
A	Canal A	G35
	Canal B	G36
	Terra	GND
	Alimentació	+5V
B	Canal A	G25
	Canal B	G26
	Terra	GND
	Alimentació	+5V
C	Canal A	G23
	Canal B	G38
	Terra	GND
	Alimentació	+5V
D	Canal A	G18
	Canal B	G3
	Terra	GND
	Alimentació	+5V

Taula 9. Pins de connexió digital dels encòders

2.5. Desenvolupament del software de mesura

Fins aquest punt de la memòria s'ha treballat el disseny modular estructural, mecànic i electrònic dels components funcionals tangibles del BAMC. Tanmateix, el procés de presa de mesures està igualment fonamentat en el conjunt d'elements electrònics que treballen de forma coordinada seguint les instruccions d'un programari específic. Aquest software de mesura ha estat íntegrament desenvolupat en el transcurs d'aquest projecte. En els següents estadis del present document es recullen les peculiaritats d'aquesta part potser no tan visible, però imprescindible pel funcionament del braç de mesura.

2.5.1. Conceptes previs i entorn de programació *Arduino*

S'entén per software de mesura un tipus de programa informàtic dissenyat per obtenir i processar dades de sensors (encòders) i altres elements electrònics per obtenir la posició d'un punt en l'espai tridimensional o una relació entre diverses d'aquestes posicions (mesura).

El software de mesura es forma per un conjunt degudament ordenat de programes. Tanmateix, la senzillesa del software desenvolupat provoca que al llarg d'aquesta memòria, els termes software i programa s'usin indistintament com sinònims.

Cadascun d'aquests programes és un conjunt ordenat i seqüencial d'instruccions que s'executen per realitzar una tasca específica en un dispositiu de processament o, com és aquest cas, un microcontrolador. Aquestes instruccions s'escriuen per mitjà d'un llenguatge de programació d'alt nivell específic i compatible, que el dispositiu pot interpretar i executar.

Per al desenvolupament d'aquest projecte específic s'ha optat per l'entorn de programació lliure *Arduino*, entorn basat en el conegut llenguatge de programació d'alta capacitat en *C/C++*. En realitat, *Arduino* és una companyia reconeguda arreu del món dedicada al desenvolupament de software i hardware obert, sobretot enfocat a la realització de projectes d'aprenentatge. Que el hardware i el software associats a la plataforma *Arduino* siguin lliures o *open source* significa que estan disponibles per al públic en general de manera oberta (sense pagar llicències ni permisos). Es tracta d'una filosofia basada en compartir el coneixement, fomentar la col·laboració i permetre que les persones puguin utilitzar, modificar i distribuir el contingut de manera gratuïta. Així doncs, l'entorn de programació utilitzat, a banda de ser gratuït, simple i molt intuïtiu, està recolzat per una extensa bibliografia i una infinitat d'informació online (biblioteques, guies d'ajuda, multitud de projectes personals diversos, etc.). Alhora, tant el llenguatge utilitzat com l'entorn de programació són compatibles amb el microcontrolador *M5Core2* implementat.

2.5.1.1. Introducció a la programació en l'entorn *Arduino*

El software de mesura desenvolupat en l'entorn de programació *Arduino* es forma per un conjunt degudament ordenat de programes. Alhora, cadascun d'aquests programes és un conjunt seqüencial d'instruccions que s'executen per realitzar una tasca específica en el microcontrolador. Les instruccions són les ordres que el dispositiu ha de seguir per realitzar una tasca concreta, com pot ser recollir i guardar les dades proporcionades per un encòder. Aquestes instruccions es conformen, bàsicament, per mitjà de variables i funcions, dos elements principals en gairebé qualsevol llenguatge de programació. Alhora, s'ordenen per mitjà d'una estructura pròpia del codi *C/C++*. Aquests tres elements esmentats, variables, funcions i estructures, són els tres components principals de la programació en l'entorn d'*Arduino*:

- a. **Variable:** una variable és una ubicació de memòria on s'emmagatzema un valor assignat. Aquest valor pot canviar, o no, durant l'execució del programa i es pot utilitzar per realitzar càlculs o per prendre decisions. En el llenguatge utilitzat n'hi ha de tantes classes com tipus de dades existeixen (text, nombre enter, nombre decimal, etc.). La seva correcta definició és molt important donat que les variables esdevenen l'objecte de treball de les funcions.
- b. **Funció:** una funció és una secció de codi que realitza una tasca específica involucrant variables o elements perifèrics del propi microcontrolador; alhora, pot ser cridada des de diferents parts del programa per evitar la repetició de línies de codi.
- c. **Estructura:** el llenguatge de programació empleat disposa de multitud d'estructures per organitzar i relacionar funcions i variables entre sí. Algunes d'aquestes estructures serveixen per comparar valors, per aplicar condicionants i prendre decisions, per definir funcions, per incloure llibreries o per generar bucles, entre moltes altres utilitats. La programació en l'entorn *Arduino* segueix una sintaxis general molt marcada. Aquesta s'observa clarament en la figura adjunta.

```
Upload Using Programmer
Blink
/*
  Blink
  Turns on an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.

  This example code is in the public domain.
  */

// Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards.
// give it a name:
int led = 13;

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize the digital pin as an output.
  pinMode(led, OUTPUT);
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  digitalWrite(led, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000);             // wait for a second
  digitalWrite(led, LOW);  // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000);             // wait for a second
}
```

Fig. 40 Estructura habitual del codi en l'entorn *Arduino*

Tanmateix, el codi de programació i les seves peculiaritats no esdevenen objecte d'estudi ni d'interès del present projecte; així doncs, els detalls i les característiques del software de mesura es treballaran de forma específica en els pròxims apartats sense caure en generalitats.

2.5.1.2. Planificació global i agents implicats

Per la conformació del programa que possibilita i regula cadascun dels processos d'adquisició de mesures i punts per mitjà del BAMC es parteix d'un planificació general. Aquesta planificació descriu el propi procés de mesura, amb les diferents etapes que s'hi donen i la interrelació entre les accions de l'usuari i cadascun dels elements electrònics. L'objectiu últim sempre és el de deduir la posició espacial del punt final del palpador, en coordenades relatives a un origen comú, a partir de la mesura dels angles rotats en les diferents articulacions del braç. Tanmateix, també cal tenir en compte que el propi programa esdevé la interfície d'interacció directa entre l'operari i el microcontrolador.

Esquemàticament, la successió d'esdeveniments que el software de mesura programat ha de contemplar són els següents:

1. **Inici del programa:** en engegar el microcontrolador s'ha d'iniciar el programa amb alguna mena de missatge de benvinguda a l'usuari. Cal mostrar la informació normativa d'identificació relativa al projecte.
2. **Menú de navegació:** l'usuari ha de poder decidir quin procediment de mesura s'ha d'executar d'entre els possibles interactuant amb el microcontrolador a través de la seva pantalla i del botó del SAP.
3. **Selecció i execució del procés de mesura:** un cop s'ha seleccionat el tipus de mesura a realitzar, el microcontrolador ha d'anar pautat a l'usuari per realitzar les accions necessàries per completar el procés de mesura per mitjà del botó del SAP i d'una senyal sonora, si més no. Per la pantalla s'han d'anar mostrar les dades recaptades a cada iteració del procés.
4. **Finalització del procés de mesura:** l'operari del BAMC ha de poder decidir quan s'acaba el procés de mesura a través del polsador del SAP.
5. **Generació del fitxer de dades:** en finalitzar el procés de mesura, el microcontrolador ha d'haver generat un fitxer de text, convenientment estructurat. Aquest s'ha de generar, nombrar i omplir de forma automàtica en la targeta microSD.
6. **Correcció d'errors:** el software de mesura ha d'incorporar alguna mena de retroalimentació per evitar l'aparició d'errors durant els estadis previs o propis del procés de mesura executat.

2.5.2. Cinemàtica del braç articulat

La primera passa en la construcció del software de mesura és analitzar cinemàticament la totalitat del braç. A partir de la deducció matemàtica del seu comportament cinemàtic (posicional i de moviment) es podrà programar un seguit d'instruccions de càlcul per deduir la posició final del palpador del BAMC en funció de les dades angulars recollides en les articulacions per mitjà dels encòders.

2.5.2.1. Caracterització cinemàtica general d'un braç articulat

Un manipulador mecànic o braç articulat qualsevol es pot modelar com una cadena articulada en llaç obert, una cadena cinemàtica oberta, doncs; aquesta cadena està formada per diversos cossos rígids, denominats membres cinemàtics en l'anàlisi de mecanismes, connectats entre sí per un parell cinemàtic que acostuma ser una articulació de revolució. Alhora, es tracta d'un mecanisme de tipologia espacial donat que les trajectòries possibles d'un punt determinat d'aquest mecanisme tenen caràcter tridimensional, no es mantenen en un mateix pla de l'espai.

En una màquina qualsevol, per a saber si un element o peça forma part del mateix membre cinemàtic que un altre, cal comprovar si hi ha moviment relatiu entre ells. Tots els elements que es mouen solidàriament, com un sol cos, es consideren un mateix membre cinemàtic. Cal no oblidar que, en tot mecanisme sempre hi ha un element fix a la referència d'estudi que, segons el context,

rep diferents noms (bancada, base, terra, etc.). Així doncs, un dels extrems de la cadena cinemàtica s'uneix a una base de suport fixa, que va unit al terra o a una superfície estable (denominada bancada a partir d'ara) mentre que l'altre extrem es troba lliure i unit a un sistema d'adquisició de punts que determinarà una posició puntual determinada. El moviment relatiu en les articulacions resulta en el moviment dels elements que posicionen l'efector final o SAP en una orientació o posició concreta. Així doncs, en l'aplicació tractada en aquesta memòria interessa la descripció espacial del sistema d'adquisició de punts respecte a un sistema de coordenades de referència fix.

Per altra banda, també convé recordar que un sòlid qualsevol en l'espai tridimensional real tindrà, a priori, 6 paràmetres independents que determinaran el moviment del mateix (3 moviments de translació i 3 de rotació, en la direcció i entorn cadascun dels 3 eixos de l'espai, respectivament). A dintre d'un mecanisme qualsevol, el moviment es pot introduir per un o un altre d'aquests, pel que pot canviar el paràmetre independent. El que no varia mai és el nombre de paràmetres independents; aquest és el nombre de paràmetres que cal conèixer o controlar per tal de determinar i/o governar tots els moviments possibles d'un mecanisme [9].

En l'àmbit de mobilitat de sistemes mecànics, es coneix el nombre de paràmetres independents d'un mecanisme com a graus de llibertat (g). Així doncs, els graus de llibertat són les variables d'entrada, és a dir, les variables independents per les quals es defineix cada moviment o comportament d'un mecanisme, i equivalen al nombre d'esforços, accions o forces que cal fer-se per determinar el moviment d'un mecanisme determinat. De graus de llibertat, se'n pot parlar en dues dimensions:

a. Graus de llibertat d'un parell cinemàtic: és el nombre de paràmetres independents que té el moviment relatiu que permet un parell. Segons el nombre de graus de llibertat d'un parell cinemàtic qualsevol, aquest podrà ser superior ($g = 2$) o inferior ($g = 1$).

En el cas del braç articulat de mesura, tots els seus parells cinemàtics són de tipus parell de revolució, també coneguts com articulacions. Aquest tipus de parell permet la rotació relativa entorn l'eix longitudinal de la superfície cilíndrica de contacte entre els membres que uneix, però bloqueja qualsevol translació del centre de rotació en direcció vertical o horitzontal. Així doncs, es tracta d'un parell cinemàtic inferior, donat que només té un grau de llibertat ($g = 1$) permetent només el moviment rotatori relatiu entre els membres que connecta. Habitualment, la variable independent que genera l'únic grau de llibertat d'aquest tipus de parell cinemàtic acostumarà a ser l'angle d'obertura entre els membres units.

b. Graus de llibertat d'un mecanisme: és el nombre de paràmetres independents que té el moviment del conjunt de membres d'un mecanisme respecte l'element fix o bancada. Si es vol governar el mecanisme, aquest nombre correspon amb el nombre d'actuadors (accions) que cal afegir al mecanisme. Per norma general, els braços de mesura per coordenades compten amb un màxim de 7 graus de llibertat (provinents tots de parells de revolució).

Per ficar-ho tot en context, si el total de graus de llibertat g és nul, o negatiu, es tractaria d'una estructura, no d'un mecanisme; de fet, si esdevé un nombre negatiu, s'estaria parlant d'una estructura sobre-restringida.

Extrapolant tota aquesta informació a un braç articulat genèric, es tindrà un mecanisme format per n membres cinemàtics independents, units entre sí per $n - 1$ parells cinemàtics de tipus articulació (parell de revolució), amb 1 grau de llibertat cadascun. Donat que es tracta d'un mecanisme espacial o tridimensional, format a més per una cadena cinemàtica oberta, la metodologia habitual d'anàlisi (cinemàtica i dinàmica) de mecanismes plans no es pot aplicar; així doncs, eines com la fórmula de Grübler, entre d'altres, perden la seva utilitat o esdevenen redundants. Tanmateix, s'observa molt clarament com, per definir una posició qualsevol del membre final (n) del braç on anirà situat el palpador o SAP, essent aquesta la finalitat última d'aquest projecte, caldrà especificar el valor de

cadascun dels $n - 1$ graus de llibertat de cadascuna de les $n - 1$ articulacions de les que es compon l'aparell. Essent les articulacions parells de revolució, d'ordre inferior, doncs, aquestes incògnites equivaldran a l'angle rotat a cada articulació entre els elements consecutius que uneix.

Per altra banda, per a realitzar l'estudi cinemàtic del mecanisme, s'acostuma a identificar i etiquetar cada membre amb un número. Al llarg del projecte, i per conveni, es reservarà el número 1 al membre fix (bancada) i es numerarà la resta d'elements seqüencialment en funció de la seva disposició al llarg del braç. Així mateix, tal i com s'ha anat utilitzant ja al llarg de la memòria, els parells cinemàtics de revolució s'identificaran per mitjà de les lletres de l'abecedari, en l'ordre alfabètic correlatiu a la disposició de les articulacions al llarg de la cadena cinemàtica que forma el BAMC.

2.5.2.2. El problema cinemàtic directe

Amb tot això, la cinemàtica o anàlisi cinemàtica d'un braç articulat tracta amb l'estudi analític de la geometria del moviment respecte d'un sistema de coordenades de referència fixe com una funció del temps sense considerar les accions (forces o moments) que originen l'esmentat moviment [9]. Així doncs, tracta la descripció analítica del desplaçament espacial del braç com una funció del temps, en particular les relacions entre les variables espacials del tipus d'articulació tractat i la posició i l'orientació de l'efector o palpador final. Així però, es poden donar dues tipologies fonamentals d'anàlisi cinemàtica:

1. Per un manipulador o braç articulat determinat, donats el valor dels angles de les articulacions i els paràmetres geomètrics de l'element, essent g el nombre de graus de llibertat, quines són la posició i la orientació de l'efector final respecte del sistema de coordenades de referència?
2. Donada una posició i orientació desitjada de l'efector final i els paràmetres geomètriques dels membres cinemàtics respecte d'un sistema de coordenades de referència, pot el braç assolir una posició diferent determinada? I si pot, quantes configuracions diferents dels elements que el formen satisfaran aquesta mateixa condició?

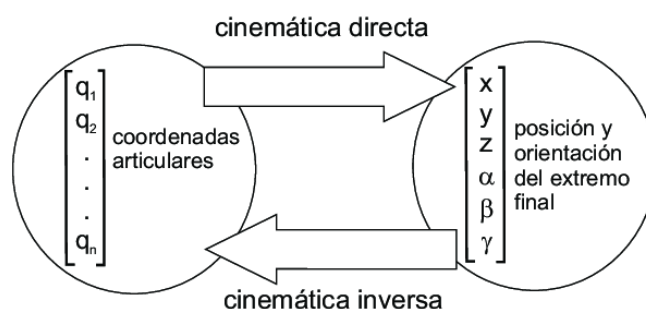


Fig. 41 Esquema del procés resolutiu cinemàtic directe i invers

La primera qüestió es coneix popularment com el *problema cinemàtic directe* mentre que la segona casuística és la pròpia del *problema cinemàtic invers* (també anomenada *solució del braç* per la seva habitual aplicabilitat en robòtica). En l'execució del present projecte, donat que interessa determinar la coordenada relativa de posició espacial d'un palpador respecte d'un sistema de referència definit, amb la prèvia recol·lecció dels paràmetres angulars de cadascuna de les articulacions del braç de mesura, s'optarà per desenvolupar el problema cinemàtic directe. El recorregut o trajectòria del braç fins al punt de mesura té una importància menor i no

transcendental per determina la posició relativa d'aquest punt, o de diversos punts de mesura consecutius. Alhora, l'acció causant del moviment dels elements mòbils serà sempre l'activitat de l'usuari. Per tant i de moment, la dinàmica del moviment no esdevé objecte d'estudi.

2.5.2.3. Caracterització cinemàtica del BAMC

Aplicant els conceptes anteriors al disseny de BAMC projectat, la *Fig. 42* adjunta recull la caracterització cinemàtica final del mateix, identificant-ne tots els membres i parells que el conformen. Aquest sistema servirà per a poder construir l'estudi cinemàtic envers el que es basarà el software de mesura per realitzar el recull de coordenades.

Resumidament, el braç de mesura dissenyat es conforma per d'una cadena cinemàtica oberta integrada per $n = 6$ membres (1, 2, 3, 4, 5 i 6), units per $n - 1 = 5$ parells de revolució o articulacions (A, B, C, D i E). Cadascuna d'aquestes unions dinàmiques aportarà al còmput global 1 grau de llibertat; aquest grau de llibertat o incògnita equivaldrà al valor de l'angle rotat instantàniament entre els dos membres units per una mateixa articulació. Així doncs, el braç de mesura comptaria amb 5 graus de llibertat. A partir del coneixement del valor exacte d'aquests 5 angles rotats respectivament a les diferents articulacions del BAMC, i establint un origen per un sistema de referència arbitrari, es podrà determinar la coordenada en la que es situa l'extrem del palpador (SAP). D'aquesta forma, exposada molt esquemàticament, es completaria el procés de mesura.

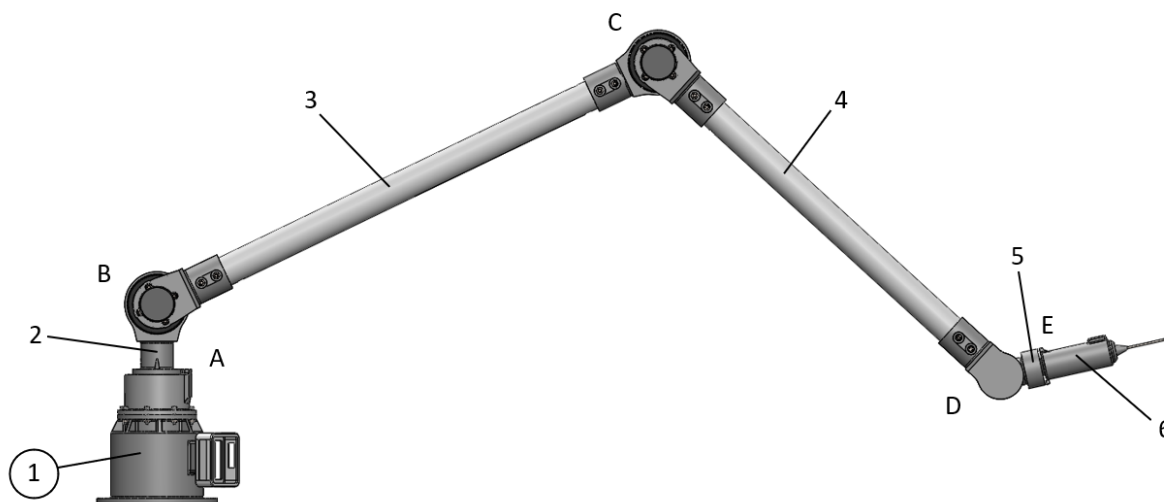


Fig. 42 Caracterització cinemàtica del BAMC projectat

2.5.2.4. Anàlisi cinemàtica del BAMC

Un cop caracteritzat cinemàticament el braç de mesura projectat, es pot passar a l'estudi de la seva geometria per determinar la posició del palpador del SAP per a cada instant de temps. La solució disposada permet conèixer aquesta posició per a qualsevol combinació de moviments i trajectòries efectuades per cadascun dels membres del BAMC. En qualsevol cas, aquest problema cinemàtic resulta força simple si es segueix el procediment d'estudi descrit en el present apartat. Aquest raonament geomètric esdevindrà la base del software de mesura desenvolupat.

Si s'observa detingudament el BAMC dissenyat, el comportament cinemàtic d'aquest es pot descompondre geomètricament en dos conjunts o fases diferenciades. Establint un sistema de

referència (SR) arbitrari $OXYZ$ amb origen de coordenades $O(0,0,0)$ just a la base del braç, en contacte amb la bancada, es pot procedir de la següent forma:

a. Cadena cinemàtica plana inicial

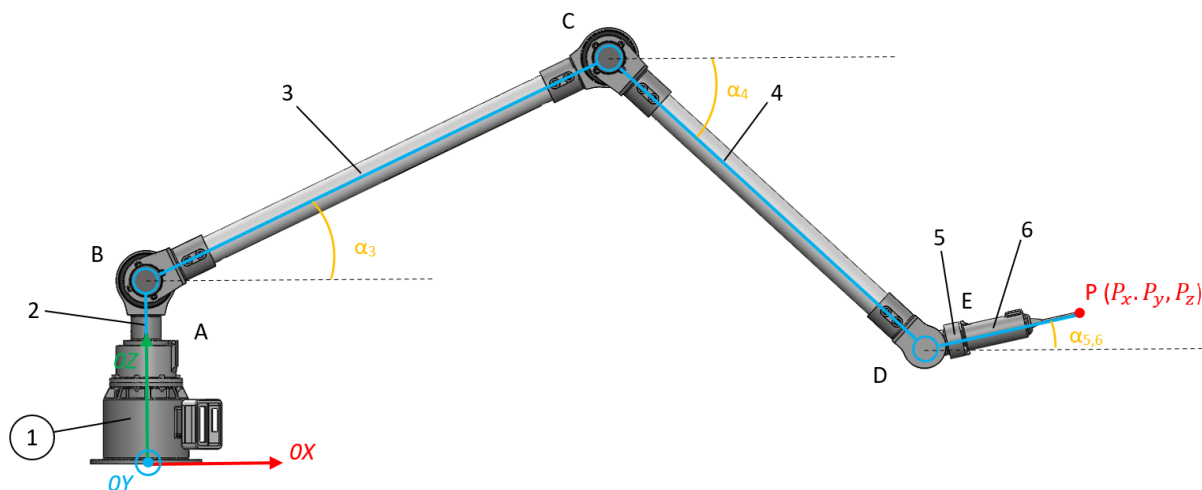


Fig. 43 Anàlisi cinemàtica de la geometria lateral (pla XY)

Cadascun dels $n = 6$ segments o elements cinemàtics del braç comptarà amb una distància entre articulacions L_n coneguda. Alhora, l'angle rotat a partir de la línia paral·lela a la bancada serà α_n per a cadascuna de les $n - 1$ articulacions. Els valors de longituds es recullen en la següent taula (FIGURA):

Identificació	Membres cinemàtics	Parells cinemàtics	Longitud
L_1	1	(1) - A	122 mm
L_2	2	A - B	92 mm
L_3	3	B - C	600 mm
L_4	4	C - D	500 mm
$L_{5,6}$	5, 6	D - (P)	155 mm

Taula 10. Dades geomètriques de l'anàlisi cinemàtica

Aïllant les articulacions B, C, D i E junt amb els membres que uneixen (3, 4, 5 i 6), aquestes formen una cadena cinemàtica oberta i plana si s'observen des del pla perpendicular als eixos de rotació dels parells B, C i D (pla XZ). Així doncs, les trajectòries dels punts del qual es mantenen sempre a dintre del mateix pla o conjunt de plans paral·lels.

Les articulacions B, C i D tenen el seus eixos de rotació paral·lels entre si, mentre que l'articulació E té l'eix de rotació perpendicular als anteriors (articulació paral·lela). A efectes pràctics això provoca que els membres cinemàtics 5 i 6 es puguin considerar com un sol element ($L_{5,6}$; $\alpha_{5,6}$); respecte del pla perpendicular als eixos de rotació dels parells de revolució B, C i D (pla XZ), la posició relativa entre els membres 5 i 6 no varia en cap cas, pel que tampoc ho farà el punt final P del palpador. Tenint en compte que es coneixen les distàncies entre articulacions B-C (L_3), C-D (L_4) i entre l'articulació D i l'extrem del palpador ($L_5 + L_6$), obtenint el valor dels angles rotats en les articulacions es pot determinar la projecció o coordenades del punt P respecte de l'eix vertical OZ (P_z) per trigonometria bàsica. També es pot obtenir la coordenada sobre el pla d'observació respecte de l'eix OX (P'_x).

$$P_z = L_1 + L_2 + L_3 \cdot \sin(\alpha_3) + L_4 \cdot \sin(\alpha_4) + L_{5,6} \cdot \sin(\alpha_{5,6})$$

$$P'_x = L_3 \cdot \cos(\alpha_3) + L_4 \cdot \cos(\alpha_4) + L_{5,6} \cdot \cos(\alpha_{5,6})$$

b. Quadrilàter articulat tridimensional

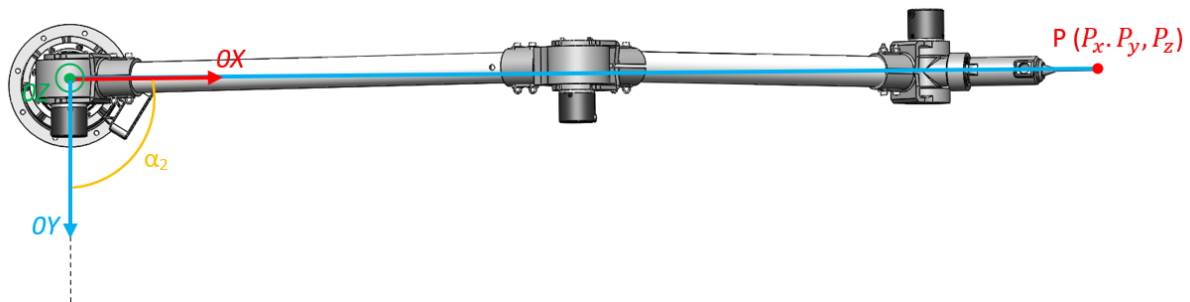


Fig. 44 Anàlisi cinemàtica superior (pla XY)

Un cop analitzat el conjunt anterior, es poden afegir els membres (1 i 2) i l'articulació (A) restants; es pot observar que es tracta ara del mateix quadrilàter articulat anterior però amb capacitat de pivotar al voltant de l'articulació inicial A respecte de la base o la bancada. Això és equivalent a fer-lo rotar al voltant de l'eix vertical OZ del SR. Així doncs, apareix un angle de rotació α_2 que determina la posició del pla d'observació anterior en el que es conté els membres 3, 4, 5 i 6.

Cal tenir en compte que, amb l'articulació A, essent aquesta una articulació classificada com paral·lela, passa exactament el mateix que passava amb l'articulació E; des del pla XZ , la posició relativa dels membres 1 i 2, units pel parell cinemàtic A, no canvia durant la rotació en aquest. Així doncs, determinant el valor d'aquesta rotació deguda al grau de llibertat aportat pel parell de revolució A, es poden determinar finalment les coordenades de la projecció del punt P respecte dels eixos horitzontals OX i OY (P_x i P_y).

$$P_x = P'_x \cdot \cos(\alpha_2)$$

$$P_y = P'_x \cdot \sin(\alpha_2)$$

$$\rightarrow P(P_x, P_y, P_z)$$

D'aquesta forma, aplicant en cada cas les equacions presentades, es pot determinar en l'espai, respecte a cadascuna de les possibles configuracions posicionals del BAMC, les coordenades del punt final P a partir del SR $OXYZ$ ubicat en el centre de la base del braç de mesura.

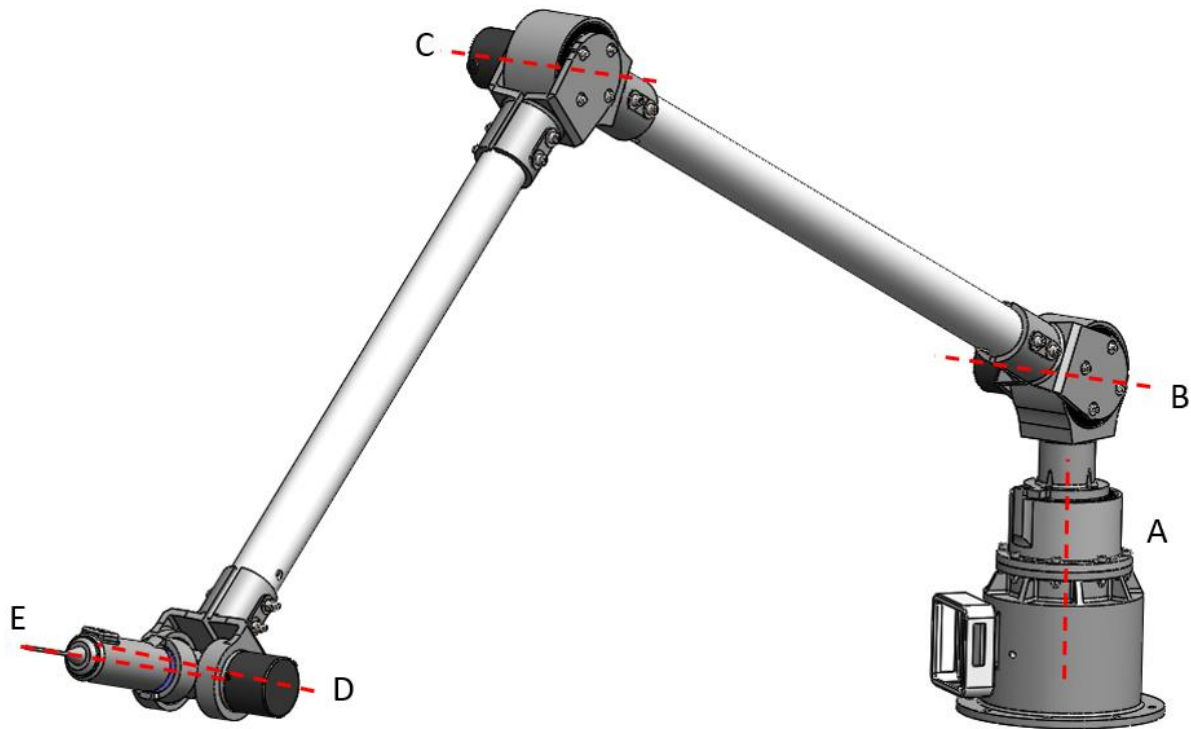


Fig. 45 Eixos de rotació de les articulacions del BAMC

2.5.2.5. Processament matemàtic de les coordenades

A partir de la recaptació de punts en l'espai per mitjà del BAMC, les coordenades obtingudes es poden treballar matemàticament per obtenir altres dades d'interès com puguin ser mesures específiques, longituds, projeccions, etc. Alhora, també es pot modificar l'origen o el SR des del qual es determinen les posicions tridimensionals dels punts recollits.

a. Càlcul de distàncies entre punts

Per calcular la distància tridimensional entre dos punts P situats a l'extrem del palpador i recollits successivament (P_1, P_2) respecte d'un mateix SR, bastarà amb determinar el mòdul del vector que formen. Així doncs, cal restar coordenada a coordenada primer i aplicar el càlcul del mòdul després.

$$P_1(P_{x1}, P_{y1}, P_{z1}); P_2(P_{x2}, P_{y2}, P_{z2})$$

$$\overrightarrow{P_1P_2} = \overrightarrow{P_2} - \overrightarrow{P_1} = (P_{x2}, P_{y2}, P_{z2}) - (P_{x1}, P_{y1}, P_{z1})$$

$$|\overrightarrow{P_1P_2}| = \sqrt{(P_{x2} - P_{x1})^2 + (P_{y2} - P_{y1})^2 + (P_{z2} - P_{z1})^2}$$

$$\rightarrow \text{dist}(\overrightarrow{P_1}, \overrightarrow{P_2})_{R^3} = |\overrightarrow{P_1P_2}|$$

També es pot determinar la projecció de la distància entre els punts P_1 i P_2 sobre un pla determinat, contingut en el SR i perpendicular a un dels seus eixos de referència. Per obtenir aquesta distància cal aplicar el procediment anterior però obviant la coordenada respecte de l'eix ortogonal al pla de

referència seleccionat. Això és equivalent a aplicar el teorema de Pitàgores envers dos parells de coordenades homòlogues (respecte els dos mateixos eixos del SR) en funció de la projecció elegida.

$$\rightarrow \text{dist}(\overline{P_1, P_2})_{XY} = \sqrt{(P_{x2} - P_{x1})^2 + (P_{y2} - P_{y1})^2}$$

$$\rightarrow \text{dist}(\overline{P_1, P_2})_{XZ} = \sqrt{(P_{x2} - P_{x1})^2 + (P_{z2} - P_{z1})^2}$$

$$\rightarrow \text{dist}(\overline{P_1, P_2})_{YZ} = \sqrt{(P_{y2} - P_{y1})^2 + (P_{z2} - P_{z1})^2}$$

Per altra banda, es pot obtenir la distància entre els dos punts P_1 i P_2 respecte de cadascun dels eixos del SR; és a dir, la projecció de la distància sobre un o diversos dels eixos del SR. Per fer-ho, bastarà amb restar les dues coordenades homòlogues (respecte un mateix eix del SR) entre els punts implicats i aplicar el valor absolut per obtenir-ne un valor positiu.

$$\rightarrow \text{dist}(\overline{P_1, P_2})_{OX} = |P_{x2} - P_{x1}|$$

$$\rightarrow \text{dist}(\overline{P_1, P_2})_{OY} = |P_{y2} - P_{y1}|$$

$$\rightarrow \text{dist}(\overline{P_1, P_2})_{OZ} = |P_{z2} - P_{z1}|$$

b. Captació de punts respecte d'un SR diferent

Per determinar les coordenades del punt P de l'extrem del palpador respecte d'un SR diferent, s'ha d'elaborar un procés matemàtic alternatiu. Els procediments vectorials habituals basats en el càlcul matricial, com pot ser el canvi de base, resulten difícils d'interpretar i poc intuïtius. Alhora, la seva implementació en el software de mesura és complexa i requereix de gran capacitat operativa i de memòria per part del microcontrolador.

Seguint la línia simplificadora del projecte, s'ha optat per fer ús d'un mètode iteratiu on les coordenades de cada punt es determinen primer respecte del SR original ($OXYZ$), situat en la base del BAMC, i es tradueixen posteriorment respecte d'un segon SR assignat arbitràriament a un punt d'interès ($OXYZ'$).

Suposant un punt arbitrari P_1 respecte del sistema $OXYZ$ inicial, si es situa un segon SR $OXYZ'$ amb origen en el punt P_1 ($O' \equiv P_1$), amb els seus eixos paral·lels respecte dels del SR original, el canvi de sistema per a un punt qualsevol P_2 resulta gairebé directe. Només s'han de calcular les coordenades del vector $\overrightarrow{O'P_2}$ que uneix els punts O' i P_2 en base al SR inicial $OXYZ$; és a dir, cal restar les coordenades homòlogues entre l'extrem del vector (P_2) i l'origen (O'). Les coordenades del vector $\overrightarrow{O'P_2}$ equivaldran a les coordenades del punt P_2 respecte del SR nou ($OXYZ'$).

$$P_1(P_{x1}, P_{y1}, P_{z1})_{OXYZ}; P_2(P_{x2}, P_{y2}, P_{z2})_{OXYZ}$$

$$\rightarrow O'XYZ \text{ amb origen en } O' = P_1(P_{x1}, P_{y1}, P_{z1})$$

$$\overrightarrow{O'P_2} = ((P_{x2} - P_{x1}), (P_{y2} - P_{y1}), (P_{z2} - P_{z1}))$$

$$\rightarrow P_2(P'_{x2}, P'_{y2}, P'_{z2})_{O'XYZ} = \overrightarrow{O'P_2}$$

Cal destacar que en aquest projecte només es contempla la utilització de nous SR amb eixos paral·lels a l'original ($OXYZ$) ubicat en el centre de la base del BAMC, en contacte directe amb la

bancada. Aquesta peculiaritat és la que permet simplificar tot el procés de càlcul reduint-lo a l'ús exclusiu d'operacions bàsiques.

2.5.3. Cos del programa

Un cop realitzat l'estudi cinemàtic del mecanisme que conforma el BAMC i tenint consciència de quines són les variables que intervenen en el procés de mesura i del tractament que cal efectuar sobre elles, es pot passar a conformar el text del software de mesura. En aquest punt de la memòria també s'introduirà el concepte d'interfície d'usuari junt amb estructures i conceptes de programació que s'han aplicat en el software de mesura desenvolupat.

Cal fer especial incís en l'estructuració d'aquest i dels següents subapartats relacionats amb el programari del BAMC; cadascun dels paràmetres i elements de programació explicats es troben adequadament referenciats a les línies o blocs de codi que els implementa. Així doncs, per comprendre i relacionar els conceptes exposats cal fer una lectura iterativa de l'apartat on es recull el cos complet del programa (*Annex 5 – Codi del software de mesura*).

2.5.3.1. Introducció a les interfícies d'usuari

Una interfície d'usuari és un conjunt d'elements que poden pertànyer al programari (software) o al maquinari (hardware) que ofereixen una informació a l'usuari, i permeten, a més, la interacció (física o lògica) entre l'usuari i l'aparell, per mitjà d'un dispositiu perifèric o un enllaç de comunicacions. D'entre de les interfícies d'usuari dissenyades per a aplicacions informàtiques i aplicatius de control electrònic, cal fixar l'atenció en les interfícies d'usuari gràfiques o GUI (*graphical user interface*). Les GUI permeten a l'usuari interactuar amb el sistema informàtic, amb el software de mesura en aquest cas, anant més enllà de la introducció d'instruccions complexes i de difícil comprensió per un usuari no expert. Les GUI són aquelles interfícies que fan servir elements gràfics, com poden ser menús, finestres o diàlegs, a més de l'ús d'altres recursos del sistema i elements perifèrics (botons, sons, etc.) per permetre a l'usuari interactuar amb l'ordinador de manera intuïtiva i senzilla [10].

Actualment hi ha un ús generalitzat de les interfícies gràfiques d'usuari. La gran majoria dels sistemes operatius tenen aquest tipus d'interfície, de tal manera que integrar aplicacions i funcionalitats sigui molt senzill, i només calgui adaptar alguns paràmetres. Fins i tot hi ha dispositius que han desenvolupat el seu sistema operatiu propi, com els dispositius mòbils, amb les seves interfícies pròpies.

Donats els objectius i l'abast del present projecte i els recursos disponibles, la interfície d'usuari gràfica que es busca desenvolupar té una complexitat relativament baixa. Bàsicament, ha de permetre a l'usuari seleccionar, controlar i seguir el procediment de mesura efectuat per mitjà del BAMC. També ha de permetre identificar possibles problemàtiques que puguin sorgir durant la utilització del braç. Tot això ha de materialitzar-se sense deixar de banda l'accessibilitat en l'ús i una certa vessant estètica; l'experiència global de l'usuari envers l'ús de l'aparell de mesura ha de ser òptima i satisfactòria.

Resumidament, les funcions que ha de complimentar la GUI del software de mesura del BAMC es poden resumir en els següents punts:

a. Configuració de la interfície d'usuari i de l'entorn de treball

La GUI esdevé en si mateixa el portal d'interacció entre l'usuari del BAMC i el propi software de mesura que controla el funcionament del mateix. Per tant, ha de permetre la comunicació entre

l'operari i l'aparell a través dels elements instal·lats disponibles i per mitjà d'accions apreciables sensorialment (pantalles, llum, sorolls, etc.).

b. Gestió i manipulació de les funcionalitats

La interfície d'usuari ha de disposar a l'abast de l'usuari cadascun dels sistemes de selecció, execució i control de les diferents funcionalitats del braç de mesura. Així doncs, esdevé la unitat de control de l'aparell de mesura dissenyat en aquest projecte. Aquesta unitat de control funcionarà sota les decisions últimes de l'operari, que seran interpretades i executades pel software de mesura. Així mateix, la interfície ha d'encarregar-se de l'arrencada, el reinici i el tancament del sistema.

c. Sistemes d'ajuda interactius

La interfície d'usuari gràfica implementada ha d'acompanyar i assessorar en cada moment del procés de mesura, des de l'engegada de l'aparell fins a l'obtenció de les dades desitjades. En certa manera, el software de mesura ha de proporcionar a l'usuari, en cada pas del procés, les diverses opcions a elegir i les accions que ha de portar a terme per obtenir la mesura final desitjada.

d. Gestió i manipulació de directoris i arxius

Tal i com s'anticipava en l'apartat inicial de marcació d'objectius, la finalitat última del BAMC desenvolupat és la d'obtenir un document en format text (.txt) amb les mesures recollides. Així doncs, el programari dissenyat ha de gestionar la creació i l'escriptura d'aquest document.

e. Comunicació entre sistemes i elements perifèrics

Per a poder materialitzar-se el procés de mesura complet, a banda del microcontrolador i dels software de mesura, es necessiten un seguit d'element electrònics perifèrics. Aquests van destinats a, o bé recollir dades d'interès, en el cas dels encòders òptics, o bé a permetre la interacció amb l'usuari de forma directa, en referència al polsador del SAP. En qualsevol cas, la interfície ha de gestionar i tenir en compte aquestes relacions.

En relació a les característiques generals que la GUI ha de mostrar, hi ha una sèrie de conceptes d'especial interès:

- **Accessibilitat i intuïció:** una interfície ha de ser intuïtiva en el seu ús, ha de mostrar amb claredat les funcionalitats que ofereix i ha de facilitar arribar-hi de manera senzilla i clara.
- **Llegibilitat:** en relació al concepte d'accessibilitat, una interfície ha de ser fàcilment interpretables i oferir una llegibilitat adequada als usuaris.
- **Simbologia:** per identificar les funcionalitats que representen o els objectius que simularan, les interfícies han de fer servir metàfores que vinculin senzillament icona o imatge amb objectiu o funcionalitat.
- **Aprenentatge i ús fàcil:** les interfícies han de ser fàcils d'usar i també d'aprendre per part dels usuaris més novells.
- **Consistència:** les interfícies han de seguir un mateix disseny i estructura entre elles. Ha d'imperar una certa harmonia que provoqui que el focus de l'usuari es centri en allò important.
- **Oferir el control de les interfícies:** una interfície ha de saber lliurar el seu control a l'usuari que la fa servir. Es busca l'assessorament de l'operari, no la presa de decisions total.
- **Anticipació:** s'hauran de preveure els possibles errors que pugui cometre un usuari o les necessitats que pugui demostrar i oferir-hi solucions abans que apareguin.

- **Autonomia i suficiència:** un usuari no ha de necessitar més informació o ajuda que la que una interfície li ofereix o, la que pot trobar a partir de les indicacions que li indicarà aquesta interfície.
- **Reduir càrrega de memòria:** per poder fer servir una interfície més d'una vegada no caldrà obligar als usuaris a recordar la ubicació de les funcionalitats, sinó que aquestes hauran de ser senzilles de trobar. No ha de ser indispensable memoritzar moltes informacions per aprendre a fer servir una interfície determinada.

Cal esmentar que, gràcies a la utilització de microcontrolador *M5Core2*, totes les prestacions recollides en els paràgrafs anteriors resulten relativament fàcils d'implementar. Com ja s'ha vist, aquesta unitat programable disposa en un mateix conjunt del microxip de processament, de les entrades i sortides digitals i analògiques necessàries i d'una pantalla LCD tàctil, entre altres elements. Així doncs, la comunicació entre el microcontrolador i els elements perifèrics resulta simple. Alhora, la interfície d'usuari gràfica es desenvoluparà majoritàriament a través de la pantalla tàctil i dels botons d'aquesta.

2.5.3.2. Interfície d'usuari en el BAMC

La interfície gràfica d'usuari desenvolupada en aquest projecte disposa d'una sèrie d'eines funcionals, comunes a moltes de les GUI presents en el mercat. D'entre aquests elements resultarà recurrent, sobretot, l'ús de finestres, menús i quadres de diàleg per fonamentar l'entorn de treball. Perquè l'usuari pugui fer servir aquests elements, haurà de fer servir algun dels dispositius perifèrics d'entrada i sortida d'informació (senyals). Aquests dispositius seran, a banda de la pròpia pantalla LCD del microcontrolador, els botons tàctils d'aquesta i el polsador instal·lat en el SAP. El microcontrolador també incorpora una sèrie d'altres mòduls amb funcions instaurades de fàbrica, com els botons d'encesa i de reinici, que també resultaran útils.

En aquest subapartat s'exposaran les diverses pantalles, i els detalls que incorporen, a través de les que es genera la interfície gràfica d'usuari; aquesta progressió engloba des de l'encesa del dispositiu fins al final del procés de mesura.

1. Engegada

L'engegada del microcontrolador, i conseqüentment del BAMC, es realitza per mitjà del botó lateral situat a l'esquerra i identificat com a tal. La programació d'aquest element d'interacció és inaccessible a través de la programació del xip utilitzant llenguatge d'alt nivell. Per tant, no s'ha d'implementar cap d'aquestes interaccions; la funcionalitat es troba programada de forma implícita en codi màquina. Tanmateix, l'engegada no implica l'aparició d'un element propi d'una GUI.

2. Pantalles inicials (línies 67 - 141)

Les tres pantalles inicials són una successió automàtica d'elements gràfics, sense cap implicació en la funcionalitat del procés de mesura. Per tant, passen d'una a l'altra en intervals de temps de 3 s. En totes elles s'observa un fons blanc amb una capçalera en color gris que incorpora la denominació de l'aparell (*BAMC MTV1.0*). En la primera apareix informació redactada envers l'autoria i la direcció del present projecte, així com la tipologia. En la segona pantalla, la informació redactada anterior desapareix en favor del logotip corporatiu i en color blau del centre estudiantil on s'ha desenvolupat el projecte, la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) i, més concretament, de l'Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG). En la darrera i última pantalla introductòria apareix una barra de càrrega, també en color blau, que indica el progrés d'inicialització del software

de mesura de forma visual. En realitat, aquest element és purament visual i només serveix de separació temporal i introductòria entre l'engegada de l'aparell i el procés de mesura en sí.



Fig. 46 Pantalles inicials del software de mesura

3. Menú principal (línies 152 - 163)

La següent pantalla és un menú principal d'inici. Visualment la pantalla es conforma d'un fons blanc i una capçalera de color gris que ho indica (tant el fons com la capçalera són constants en la majoria de pantalles següents). En aquesta pantalla l'usuari pot elegir entre dues opcions envers el procés de mesura; es pot decantar per mesurar punts (coordenades) o distàncies entre punts.

La navegació i selecció en aquest menú es realitza utilitzant els tres botons tàctils de la pantalla LCD del microcontrolador. L'opció

posicionada es marca per mitjà d'un punter en forma de rectangle blau que enquadra el text corresponent. El botó tàctil de l'esquerra serveix per retrocedir i el de la dreta, per avançar a la següent

opció. Amb el botó central es selecciona l'opció elegida. Les funcions de cadascun d'aquests botons estan indicades per una petita escriptura a sobre de la seva posició en la pantalla (*ant.*, *OK* i *seg.* d'esquerra a dreta, respectivament). A la part superior de la pantalla es convida a l'usuari a seleccionar una de les dues opcions possibles per mitjà d'un quadre de diàleg.

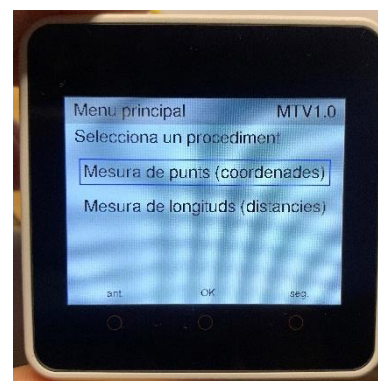


Fig. 47 Pantalla del menú principal del software de mesura

4. Menú mesura de punts (línies 348 - 413)

Si l'usuari selecciona l'opció de mesurar punts, s'obre una segona pantalla similar a l'anterior que conforma un segon menú de selecció. A banda dels constants fons blancs i la capçalera grisa indicativa (estan presents en totes les pantalles), en el menú es disposen dues opcions, de nou; l'operari pot elegir mesurar coordenades de punts respecte d'un SR global (situat a la base del BAMC), o pot seleccionar l'opció de mesurar respecte d'un nou origen. El funcionament i la metodologia de selecció és idèntica a la del menú principal.

5. Menú mesura distàncies (línies 415 - 480)

Si pel contrari l'usuari selecciona l'opció de mesurar distàncies, s'obre una pantalla similar a l'anterior que conforma el respectiu menú de selecció. En aquest cas, també es pot seleccionar entre dues opcions possibles; es pot mesurar la distància total sobre la recta que uneix dos punts en l'espai o es poden mesurar les projeccions d'aquesta distància sobre els eixos ortogonals del SR global anteriorment esmentat. El funcionament i la metodologia de selecció és idèntica a la del menú principal.

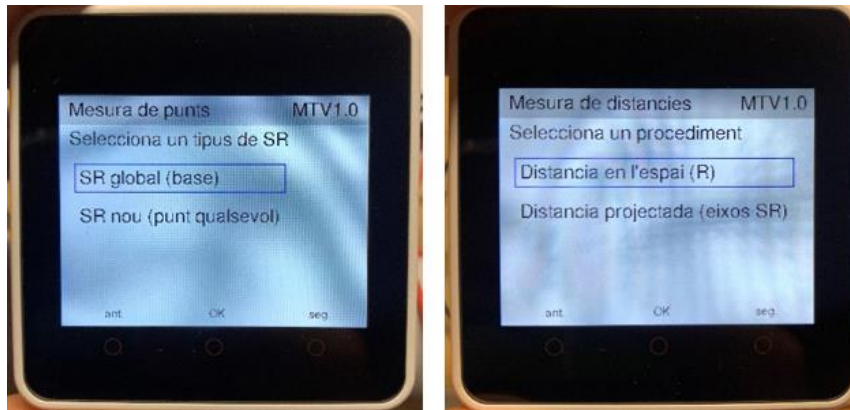


Fig. 48 Menús de mesura de punts (esquerra) i distàncies (dreta) del software de mesura

6. Procés de mesura punts I (línies 482 - 576)

El procés corresponent a la primera opció del menú de mesura punts és aquell que utilitza com a origen el punt geomètric central situat a la base del BAMC. Així doncs, en la pantalla inicial del procés ja s'indica a l'usuari que es pot començar amb la recollida de punts. Per mitjà d'instruccions numerades i successives, la interfície exposa les accions que ha de realitzar l'operari del braç. Primer cal situar el palpador del SAP en el punt desitjat; acte seguit, cal prémer el polsador instal·lat en el SAP i mantenir la posició de forma estable; finalment, un soroll emès pel microcontrolador indica que l'adquisició de coordenades s'ha efectuat correctament. Tots els estadis del procés van controlades i pautes temporalment per a possibilitar la comunicació, entre els encòders i el microcontrolador, i la correcta realització dels càlculs.

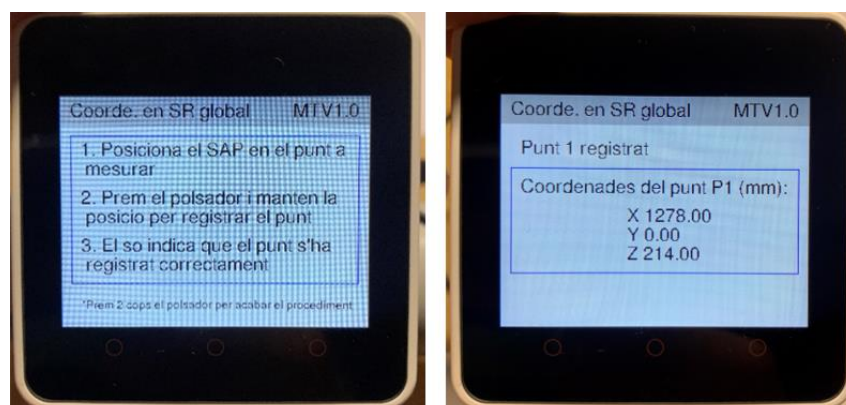


Fig. 49 Pantalles del procés de mesura de punts I

Per a cada punt registrat apareix una pantalla que confirma l'adquisició i exposa les coordenades tridimensional del mateix. Aquesta mateixa pantalla indica la numeració del punt mesurat, per informar a l'usuari del nombre de punts recaptats. Després d'una espera de 3 segons, es torna a la pantalla anterior per seguir amb el procés de mesura. Per finalitzar el procés, tal i com s'indica per pantalla, cal prémer dos cops seguits el polsador. Si l'usuari no dona l'ordre de finalitzar-lo, la mesura continuarà fins al punt enèsim.

7. Procés de mesura punts II (línies 578 - 728)

En aquesta segona opció de mesura de punts, es dona la possibilitat d'elegir quin punt s'utilitza com a origen del sistema de coordenades de referència. Així doncs, a banda de les pantalles de la interfície descrites en el paràgraf anterior, que es mantenen de forma idèntica, se n'inclou una d'inicial. Aquesta pantalla exposa la informació necessària per posicionar el punt d'origen del SR; bàsicament, és el procés habitual d'adquisició de punts. Les pantalles posteriors també són iguals respecte del procés de mesura de punts inicial.

8. Procés de mesura distàncies I (línies 730 - 896)

La primera de les opcions del menú de mesura de distàncies proporciona la mesura entre dos punts en l'espai tridimensional. A fi d'assolir aquesta dada, es succeeixen una sèrie de pantalles que segueixen la mateixa tònica estètica de les analitzades fins ara. De fet, es tracta de les mateixes pantalles utilitzades en el procés de mesura de punts però adaptades pel que fa a les instruccions mostrades. En el procediment, primer s'adquireixen les coordenades d'un punt *i*, successivament, les d'un segon, a través de dues pantalles individuals (una per cada punt) que indiquen a l'operari què fer; després de calcular-se els paràmetres necessaris, una tercera pantalla apareix confirmant l'adquisició d'ambdós punts (amb numeració actualitzada), les seves coordenades, i la distància entre ells. Si no s'atura el procediment per mitjà de la premuda doble del polsador, el procés de mesura continua donant-se fins al punt enèsim.

9. Procés de mesura distàncies II (línies 898 - 1075)

Per a la segona opció d'entre les possibles envers la mesura de distàncies, la successió de pantalles és idèntica a l'anterior. L'única peculiaritat és que, en la pantalla següent a l'adquisició de dos punts consecutius, es mostren les distàncies projectades sobre els tres eixos del SR en comptes de la distància tridimensional total.

10. Final del procés de mesura

En qualsevol dels quatre procediments possibles, la pantalla final del procés de mesura és sempre la mateixa i per arribar-hi, cal accionar dos cops seguits el polsador del SAP. Aquesta pantalla indica de forma destacada per mitjà d'un quadre de text que la mesura ha finalitzat. Alhora, convida a l'usuari a extreure la targeta de memòria microSD per obtenir les dades recaptades i a reiniciar l'aparell. Per tornar a començar el procés de mesura sempre caldrà reiniciar el microcontrolador per mitjà del botó inferior que porta incorporat i que s'identifica per mitjà d'una fletxa circular oberta.

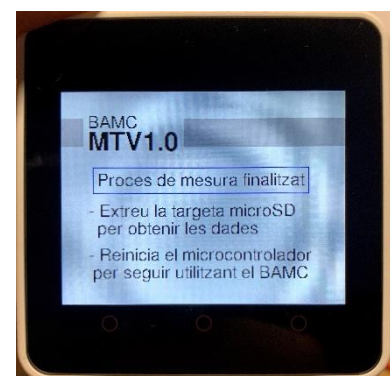


Fig. 50 Pantalla final del procés de mesura

11. Error de lectura de la targeta SD (línies 277 -302)

La targeta de memòria microSD, que s'introdueix en la unitat del microcontrolador per la part inferior utilitzant l'obertura corresponent, resulta essencial per portar a terme el procediment de mesura. En ella es generen i escriuen els documents genèrics de text (.txt) que contenen les mesures preses. Alhora però, la targeta conté els arxius d'imatges (.jpg) necessari per a generar algunes de les pantalles de la interfície d'usuari. Per tant, si des d'un primer moment la targeta no s'introdueix o no es pot llegir correctament, apareix una pantalla que ho indica per mitjà d'un quadre de text. Aquesta pantalla també incorpora el fons blanc i la capçalera d'identificació habituals. Alhora, exposa a dintre d'un rectangle vermell les passes que ha de seguir l'usuari (comprovació de la posició de la targeta, format amb el que ha de comptar i reinici del programa, en aquest ordre). Si apareix aquesta pantalla, l'única forma de sortir-ne és reiniciant el programa un cop solucionat el problema amb la microSD.

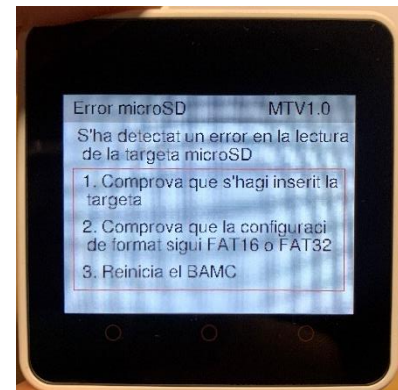


Fig. 51 Notificació d'error en la targeta microSD

12. Apagat/reinici

Tant l'apagat del microcontrolador com el seu reinici, tal i com passava amb l'engegada, es porten a terme per mitjà dels botons laterals que incorpora el propi aparell electrònic. El botó d'apagat coincideix amb el d'engegada, i es troba en el lateral esquerre del microcontrolador. Està degudament senyalitzat amb el símbol corresponent. El botó de reinici, com ja s'ha esmentat, es localitza en la part inferior, al costat de la ranura de la targeta microSD, i s'identifica per mitjà d'una fletxa circular oberta. Alhora, la funcionalitat d'aquests dos elements és implícita del codi màquina del xip, pel que no s'ha de programar cap d'aquestes interaccions.

Per a poder establir la interacció entre l'usuari i la interfície descrita fins aquí, a nivell de programari, s'han implementat una sèrie d'estructures i tècniques de programació específiques. Aquestes permeten la reactivitat del software a la presa de decisions i les accions portades a terme per l'operari del BAMC.

2.5.3.3. Expressió gràfica

La interfície gràfica d'usuari descrita en l'apartat anterior es forma d'una sèrie repetitiva d'elements visuals. Aquests són els responsables de la interacció entre usuari i braç de mesura, sobretot pel que fa a la transmissió gràfica d'informació a través de la pantalla LCD. Per altra banda però, també possibiliten el manteniment d'una imatge corporativa adequada i coherent, homogènia i estèticament equilibrada. Això últim resulta essencial a l'hora d'elaborar un software com el desenvolupat en el present projecte.

A. Colors

Els colors mostrats en les pantalles de la GUI formen part del mode principal HSB (*Hue Saturation Brightness*) per mitjà de la carta hexadecimal pròpia de la informàtica.

La paleta de colors seleccionada va en relació a la imatge corporativa de la Universitat Politècnica de Catalunya, l'entitat educativa on s'ha desenvolupat el projecte. Així doncs, hi predominen els colors blaus, blancs i grisos en versions poc saturades per afavorir l'atractiu visual. La paleta resultant també va en concordança amb els colors del muntatge físic del BAMC.

B. Tipografia

Per a gairebé la totalitat de la interfície s'ha elegit una tipografia formal i neutra, sense serigrafia i clara. Es tracta de la coneguda com *Free Sans*. Aquesta tipografia compta amb un pes mitjà en la majoria de pantalles; en ocasions també s'aplica en negreta per a destacar, per exemple, la nomenclatura del BAMC. Les mides elegides (en altura de píxels) són 15, 10 i 5. La primera mida s'aplica en títols i capçaleres; la segona, en el text general i les instruccions per a l'usuari; la darrera i més petita, serveix per fer comentaris i indicacions a peu de pantalla. En tots els tamanyos s'ha fet ús de la versió regular, sense cursiva.

La totalitat dels recursos textuais es presenten de forma justificada i amb alineació lateral a l'esquerra. Alhora, tot el text s'ha exposat en color negre. Així, tant sobre el fons blanc majoritari com a les capçaleres grises, la lletra i el missatge destaquen per sobre de qualsevol altre element visual. Això possibilita la transmissió clara de la informació, concepte clau en l'elaboració d'interfícies gràfiques d'usuari. Per mitjà de la combinació dels paràmetres de tipografia esmentats, i fent ús sobretot de la variació de mida, es genera una jerarquia tipogràfica coherent i adequada

Així doncs, s'ha fet servir una sola família tipogràfica, amb poques varietats o estils, dotant d'un caràcter formal a aquest aspecte del grafisme. En cap cas s'ha fet servir el subratllat ni l'alineació central del text; aquesta només s'aplica en els títols inicials que ocupen una sola línia de text.

C. Composició i formes

En totes les pantalles l'espai disponible (320x240 píxels) es troba dividit en blocs de contingut. Habitualment s'hi presenta una capçalera informativa en la part superior, mentre que les instruccions o la informació es situen en la part central. En tot moment apareixen marges considerables i es manté tant l'equilibri visual com l'ordre. Això ve provocat per una alineació total dels elements i el manteniment del centratge i de l'espai lliure entre ells; la composició es deixa respirar en totes les finestres de la interfície.

Envers les geometries, la forma predominant és el rectangle. Aquest s'aplica tant en el disseny de capçaleres com en el requadre de textos per destacar-los. També s'ha implementat en forma de punter, per indicar a l'usuari quina és l'opció que s'està seleccionant de cada menú.

A banda dels procediments de càlcul i l'adquisició de dades, la programació enfocada a l'aspecte visual de la interfície d'usuari és la de major complexitat en el software de mesura desenvolupat.

2.5.3.4. Arxius resultants

Un cop acabat el procediment de mesura per mitjà del BAMC projectat, les dades resultants s'emmagatzemen en un arxiu de text (format *.txt*). Aquest arxiu es genera des de zero en la microSD a l'inici del procés de mesura i la informació s'hi va redactant de forma progressiva i ordenada a mesura que s'hi avança. El format de redacció permet introduir les dades recollides en un software CAD per elaborar un model tridimensional de l'element real mesurat .

Envers la composició del document, en funció del tipus de procediment de mesura, es poden generar 2 grans variants:

- a. **Mesura de punts:** sota la denominació de *PuntsBAMC.txt* es troba un document dividit en 4 columnes. La primera indica la numeració del punt adquirit (P_n , per $n = 1, 2, 3, \dots$), mentre que les altres tres columnes es corresponen a les coordenades dels eixos del SR *OXYZ*, respectivament (P_{xn} , P_{yn} i P_{zn}). En el cas del procediment de mesura de punts amb un origen arbitrari (elegit per l'usuari), la disposició es manté igual. Només cal tenir en compte que les coordenades de cada punt van referenciades al designat inicialment com a origen.

	Px	Py	Pz
P1	1278.00	0.00	214.00
P2	1278.00	0.00	214.00
P2	1278.00	0.00	214.00

Fig. 52 Matriu generada en el document de punts (coordenades)

- b. **Mesura de distàncies:** amb el nom de *DistanciesBAMC.txt* es troba un document distribuït per mitjà de 5 columnes diferenciades. La primera indica entre quins dos punts s'ha mesurat la distància (P_n i P_{n-1} , per $n = 1, 2, 3, \dots$) i les altres quatre columnes es corresponen a les distàncies en l'espai entre els punts anteriorment indicats (d_{total} , d_x , d_y i d_z); s'exposa tant la distància tridimensional com les projeccions d'aquesta sobre els eixos del SR en qualsevol dels processos de mesura.

	DistR	DistX	DistY	DistZ
P1-P2	0.00	0.00	0.00	0.00
P2-P3	0.00	0.00	0.00	0.00
P4-P5	0.00	0.00	0.00	0.00
P6-P7	0.00	0.00	0.00	0.00
P8-P9	0.00	0.00	0.00	0.00

Fig. 53 Matriu generada en el document de distàncies

Ambdós documents es generen des de zero en la targeta microSD sempre que s'hagin eliminat (o canviat de nom) un cop extreta la informació. Del contrari, les dades de nova adquisició s'incorporaran al document propi d'un procés de mesura anterior com una fila més, a continuació de la informació ja present. Així doncs, el document tindrà tantes files com iteracions del procés de mesura es facin.

 DistanciesBAMC	Document de text	1 KB
 PuntsBAMC	Document de text	1 KB

Fig. 54 Directori generat automàticament en la targeta microSD

Les línies del programa encarregades de desenvolupar aquesta funció són l'interval 182 – 224 per l'arxiu de coordenades de punts, i 226 – 275 per a les distàncies.

2.5.3.5. Programació amb atenció a la interrupció

Part del desenvolupament del software de mesura s'ha portat a terme per mitjà d'un enfocament basat en l'atenció en la interrupció. La programació amb atenció a la interrupció és una tècnica essencial en el desenvolupament de sistemes amb interacció entre usuari i processador en temps real, on el control i la resposta ràpida als esdeveniments són essencials. La també denominada com programació amb maneig d'interrupcions permet gestionar esdeveniments, interaccions i situacions especials que poden ocórrer en un sistema de manera asincrònica, en qualsevol moment, i simultània, sense bloquejar o interrompre l'execució habitual del programa principal i de les subrutines o funcions que inclou aquest. Així doncs, possibilita materialitzar accions secundàries en segon pla, de manera ordenada i sense que l'eficiència del sistema es vegi afectada.

Bàsicament, una interrupció ve determinada per l'ocurrència d'un senyal o esdeveniment extern que provoca la bifurcació a una direcció específica de la memòria, provocant que s'executi una subrutina (rutina de tractament o gestor d'interrupció) associada a la mateixa. Aquests senyals poden ser generats per diferents fonts, com ara sensors, perifèrics i temporitzadors, entre altres. Quan es produeix una interrupció, s'atura temporalment i momentània l'execució del programa principal i es commuta cap a un gestor d'interrupció específic. Això permet respondre immediatament a un esdeveniment sense haver d'esperar que el programa principal arribi a un punt de comprovació. Aquest fet, augmenta substancialment l'eficiència del software. Acte seguit, un cop interpretada la interrupció, es retorna el control al punt del programa principal interromput. Amb tot això, aquest tipus de programació és particularment útil quan es tracta de controlar esdeveniments externs, com ara entrades de sensors o comunicacions de perifèrics.

En el present projecte, per a una interacció usuari-microcontrolador òptima, s'ha implementat la programació amb atenció a la interrupció pel funcionament tant dels encòders òptics com del polsador localitzat en el SAP.

A banda de les pròpies interrupcions, els gestors d'interrupció o rutines de tractament també resulten elements essencials; aquests són funcions o subrutines que s'executen quan es produeix la interrupció amb la que estan associats. Aquestes funcions es dissenyen per gestionar l'esdeveniment ocorregut i, després, retornar l'execució al programa principal. Alhora, acostumen a ser eficients i ràpides donat que han de processar esdeveniments i proporcionar una resposta en temps real. En el software desenvolupat, s'han dissenyat dues rutines de tractament principals; una està dedicada a l'accionament del botó del SAP; l'altra s'enfoca en detectar i mesurar el moviment angular a les articulacions de braç de mesura.

El gestor d'interrupció associat al polsador del SAP comptabilitza, durant les rutines del programa principal que ho requereixen, el nombre de cops que s'acciona. Així doncs, permet activar el procés d'adquisició de punts (amb 1 pulsació), i de distàncies, i la finalització del mateix (amb 2 pulsacions). Pel contrari, cada gestor annexat a cadascun dels 4 encòders òptics instal·lats en el BAMC permet la detecció, la mesura i la determinació del sentit de gir del moviment angular a les articulacions del braç. Aquesta tasca es realitza de forma contínua a mesura que s'utilitzen les dades angulars dels desplaçaments articulars per a la deducció del punt on es situa el palpador del SAP.

En funció de la complexitat d'un sistema, hi pot haver diverses fonts d'interrupcions. Per garantir que les més importants siguin manejades primer, les interrupcions solen comptar amb una jerarquia marcada per diferents nivells de prioritat. Això permet al programa gestionar l'ordre per executar les interrupcions crítiques amb preferència.

En el cas del software de mesura projectat, la prioritat de les interrupcions causades pel gir dels encòders i la de les generades per l'accionament del polsador són equivalents. És a dir, en donar-se de forma simultània no hi ha un ordre establert d'execució. Això es deu a que la causa o l'esdeveniment d'ambdues interrupcions és d'un mateix tipus; en els dos casos es tracta d'una interrupció associada a un pin d'entrada de senyals digitals. Aquest falta de jerarquia no provoca cap conflicte donat que, per la pròpia construcció del programa i pel disseny del procediment de mesura, en cap cas es poden donar els dos tipus d'interrupcions de forma simultània durant el funcionament del BAMC.

Mitjançant l'ús de les interrupcions, el rendiment del software de mesura s'ha pogut optimitzar en gran mesura evitant l'ús continuat de bucles de comprovació per gestionar esdeveniments. Això redueix la càrrega del microxip del microcontrolador i els temps d'execució permetent un control més eficient del sistema.

Si bé les interrupcions són una eina útil, també impliquen el perill de que s'implementi una complexitat addicional; poden afegir complexitat al codi, ja que s'ha de gestionar alhora el flux d'execució principal i els gestors d'interrupció. Per evitar caure en aquest parany, es requereix una planificació i gestió del software a desenvolupar adequades.

En aquest cas, les interrupcions es defineixen inicialment en el programa (línies 73 - 82) i es van cridant a mesura que es necessiten.

2.5.3.6. *Polling*

En l'apartat anterior s'ha vist la importància de la programació amb atenció a la interrupció; així doncs, resulta recurrent aplicar aquest mateix concepte per al control i la interacció usuari-software per mitjà dels tres botons tàctils implementats en la pantalla LCD del microcontrolador *M5Core2*. Malauradament, per la pròpia construcció del microcontrolador, els tres botons de la pantalla esdevenen elements capacitius que no permeten la interacció amb els pins que tenen associats. Així doncs, no es pot accedir ni treballar sobre les entrades digitals dels pins GPIO37, GPIO38 i GPIO39 (del botó de l'esquerra, el central i el dret, respectivament) per mitjà del software utilitzant un llenguatge de programació d'alt nivell. Per tant, l'enfocament de programació per mitjà d'interrupcions no pot aplicar-se en aquest cas.

Per solucionar aquesta problemàtica, en el present projecte s'ha optat per implementar en el programa principal del software de mesura una sèrie de subrutines que simulen el funcionament i els efectes d'una interrupció. Aquest enfocament està basat en el *polling*, terme que es pot traduir com *sondeig* o *enquesta* en aquest àmbit. Es tracta d'una tècnica de programació en la qual es

comprova periòdicament l'estat o la disponibilitat d'un recurs o condició en lloc d'esperar passivament a què es produeixi un esdeveniment. Aquesta tècnica s'utilitza per monitoritzar canvis constants en l'estat d'un element perifèric o recurs, com ara entrades d'usuari, sensors, arxius, xarxes o altres esdeveniments asincrònics. En lloc d'utilitzar interrupcions o esdeveniments per detectar canvis en l'estat, l'enfocament del sondeig implica l'execució regular d'una rutina de comprovació per verificar si ha succeït o no un canvi.

Per altra banda, el *polling* comporta una sèrie d'inconvenients que cal controlar i que provoquen que, en certes aplicacions amb canvis d'estat poc freqüents, sigui un mètode molt ineficient. D'entre aquestes inconveniències cal destacar el consum de recursos de la unitat de control (*CPU*) o del microxip; fent ús d'aquesta tècnica el consum serà sempre més elevat per a una mateixa aplicació que en el supòsit d'utilitzar interrupcions. Això és degut a que la rutina de sondeig s'executa repetidament per realitzar la comprovació, hi hagi o no canvis d'estat. També existeix el risc que els canvis es detectin amb certa demora. El programa només verifica periòdicament l'estat, cada cert interval de temps, en lloc de reaccionar immediatament davant d'un esdeveniment; aquest fenomen temporal es coneix com latència.

En el software de mesura desenvolupat en aquests apartats, el *polling* s'ha implementat com una part fonamental de la interfície d'usuari. Així doncs, en cadascun dels tres botons de la pantalla LCD del microcontrolador, en lloc d'esperar que siguin premuts i conseqüentment generar una interrupció, el programa de sondeig comprova repetidament si s'han accionat. La utilització dels botons de la pantalla només es projecta durant la navegació a través de les pantalles dels menús de selecció del procediment de mesura, prèvies al mateix. Per tant, l'ús previst és puntual (en comparació a la durada del procés de mesura) i es troba localitzat dintre de la totalitat del programa. Alhora, es requereix de canvis d'estat constants; els dos botons laterals serveixen, indistintament, per moure un punter de selecció amunt i avall, mentre que el botó central activa la selecció de l'opció on es situa el punter. Així doncs, el sondeig esdevé una opció eficientment òptima i aplicable, doncs.

La implementació del *polling* en el programa es pot veure entre les línies 305 – 345 per al menú principal, 372 – 413 per al menú de mesura de punts i 439 – 480 per al de la mesura de distàncies.

2.5.3.7. *Debounce*

El *debounce* és el terme utilitzat tant per denominar al fenomen elèctric que pot ocórrer quan s'acciona o s'allibera un interruptor, com per la solució habitualment implementada per donar-li resposta. Quan es prem o es deixa anar un botó físic, els contactes metàl·lics interns del botó, encarregats de tancar i obrir el circuit, no adquireixen immediatament una posició de manera completa i estable. En canvi, oscil·len durant un curt període de temps a causa de la seva naturalesa mecànica o per la pròpia imprecisió de l'usuari, generant-se diversos canvis d'estat elèctric. Aquest comportament de rebot pot ser interpretat pel circuit com múltiples premsades o deixades anar encara que, aparentment, només s'hagi polsat un sol cop el polsador. Així doncs, un senyal elèctric que hauria de ser lineal o homogeni pot presentar certes anomalies, canvis d'estat parcials o complets, en forma de disruptions de major o menor mesura. Una gran part de la bibliografia es refereix habitualment a aquestes alteracions com "soroll". Amb això, el *debounce* pot causar errors en el funcionament de circuits electrònics programables o respostes inesperades.

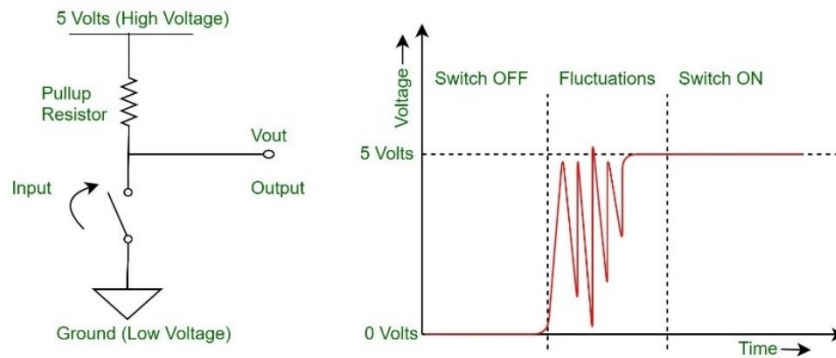


Fig. 55 Exemplificació gràfica del *debounce* amb un interruptor

Per mitigar l'efecte del rebot en bornes dels interruptors, es poden prendre mesures a dos nivells diferents per tal d'eliminar les alteracions del senyal i captar només el canvi d'estat real.

- a. **Hardware:** a nivell de hardware es poden implementar elements físics a nivell de circuit (components electrònics) tals com condensadors i resistències per filtrar els senyals d'entrada i reduir el soroll. La forma més senzilla de *debounce* per hardware és connectar un condensador en paral·lel amb el dispositiu d'accionament. Aquesta mesura comporta l'avantatge de no incrementar el temps d'execució del codi o programari. Alhora, acostuma a ser una solució més robusta. Malauradament, impliquen un augment de la complexitat, i consegüentment dels recursos destinats, en el muntatge.
- b. **Software:** a nivell de software, el *debounce* s'implementa mitjançant un retard o pausa en el programa després de la detecció d'un canvi d'estat degut a un interruptor. Això permetrà l'estabilització dels contactes prèvia a la interpretació del senyal elèctric causat pels mateixos considerant així només el canvi d'estat significatiu. També es poden utilitzar tècniques més avançades, com el seguiment d'un temporitzador i la comprovació de l'estat del botó després d'un cert temps.

Generalment, la solució òptima sorgeix de la combinació entre mecanismes de hardware i programari. Tanmateix, el *debounce* resulta molt adient quan es treballa amb botons o interruptors en l'electrònica i la programació; ajuda a garantir un comportament fiable i previsible quan s'interactua amb dispositius físics, sobretot quan hi intervé el factor humà (usuari).

El concepte del *debounce* adquireix especial importància quan es treballa per mitjà d'un software enfocat a la programació amb atenció a la interrupció. Igualment, també esdevé útil quan s'implementa junt a la programació en *polling* (apartats 2.5.3.6. *Polling* i 2.5.6.7. *Debounce*). Ambdós supòsits, així com la utilització de botons i polsadors, es donen de forma simultània en el software de mesura desenvolupat per al funcionament del BAMC. En aquest cas, per assegurar la precisió en la detecció de pulsacions, tant del polsador del SAP com dels botons tàctils de la pantalla LCD del microcontrolador, s'ha optat per implementar el *debounce* tant a nivell de software com de hardware. La implementació a nivell de hardware resulta molt complexa envers els botons tàctils, pel que només s'implementarà en el polsador. Amb tal finalitat, es connectarà un condensador de 1 μ F en paral·lel al polsador.

En el cas de les subrutines amb enfoc *polling*, s'ha incorporat al final de cada cicle de comprovació o sondeig una instrucció d'espera de 100 ms; aquesta resulta suficient per verificar la veracitat d'una interacció entre l'usuari i un dels botons tàctils de l'M5Core2. En els blocs de programació amb atenció a les interrupcions, s'han implementat al final de cada gestor, o rutina de tractament, una

instrucció d'espera. Tant per a cadascun dels 4 encòders com per al polsador del SAP, l'espera és també de 100 ms.

El *debounce* per software es deixa veure en el programa elaborat en les línies 1086 i 1094, per exemple.

2.5.3.8. Elements del programa

Amb tot això, per materialitzar el software de mesura en forma de codi escrit, es requereix d'una sèrie d'elements propis del llenguatge d'alt nivell utilitzat (C/C++) i de l'entorn de programació (*Arduino*). Alhora, aquests elements han de poder ser interpretats pel microcontrolador *M5Core2*. En aquest apartat i de forma molt breu, es repassaran els elements bàsics que conformen el software de mesura.

- **Llibreries:** una llibreria és un conjunt de codi predefinit que facilita la realització de certes tasques específiques. Les llibreries són una part essencial de l'entorn d'*Arduino* i estan dissenyades per simplificar la programació i estalviar temps. Poden contenir funcions, classes o mètodes que són útils per a un propòsit concret. Alhora, les llibreries permeten que l'entorn de programació reconegui en la compilació del codi les instruccions específiques i compatibles amb, per exemple, el microcontrolador utilitzat.
- **Instruccions:** el terme instrucció es refereix a una ordre o comanda específica escrita en el codi del llenguatge de programació utilitzat. Les instruccions són la base de la programació i defineixen les accions que es volen portar a terme. Cada instrucció equival a una tasca concreta a executar.
- **Variables:** una variable és una porció de la memòria del microcontrolador, en aquest cas, que s'utilitza per emmagatzemar informació (valor numèric, text, etc.) sota una denominació concreta. Aquesta denominació permet que la variable pugui ser referenciada en qualsevol part del codi. Les variables són fonamentals en la programació ja que permeten guardar, manipular i utilitzar dades en diferents parts del teu codi. En definir-les, a cada variable li correspon un tipus de dada (nombres enters o reals, variables o constants, etc.) que com s'emmagatzemen i es processen.
- **Funcions:** una funció es pot definir com un bloc de codi que realitza una tasca específica per mitjà d'un conjunt d'instruccions que es poden executar de manera independent dins del programa. S'identifiquen amb una denominació particular i cal definir-ne els paràmetres d'entrada i el tipus de variable de sortida, en cas que en tinguin. Tot això permet que es puguin cridar en qualsevol moment i en diferents supòsits. Les funcions són una part fonamental de la programació estructurada i modular, ja que permeten dividir el programa en parts més petites i de fàcil gestió.
- **Estructures de control:** les estructures de programació són els elements que permeten organitzar i gestionar l'execució de les instruccions del codi d'una forma diferent a la seqüenciació simple; en l'entorn de programació *Arduino*, les línies de codi s'executen per ordre seqüencial d'escriptura si no s'introdueix cap estructura de control. Així doncs, les estructures permeten executar, repetir o eludir instruccions concretes per mitjà de condicions i comparacions de variables.

2.5.3.9. Programa complet

Havent vist tots els elements de programació exposats en els apartats anteriors, es presentarà ara el cos del software de mesura definitiu implementat en el microcontrolador *M5Core2*. Cal recordar que, a través de la numeració lateral de les línies de codi, cada bloc programat es referencia amb l'exposició del concepte associat en els apartats anteriors.

Donada la seva extensió, el codi complet es recull en els annexes (*Annex 5 – Codi complet del software de mesura*).

3. Disseny al detall

Un cop s'han exposat els blocs constructius principals que conformen el BAMC, en termes d'estructura i de software de mesura, es pot passar a un enfoc més concret i particular. Així s'inicia l'etapa d'Enginyeria de Detall, la tercera fase del mètode *PREDICA* per a la gestió de projectes. En aquest apartat es desenvolupen els detalls constructius i es porta a terme l'elecció de components normalitzats que s'inclouran en el prototip funcional del braç de mesura. És el pas previ a l'elaboració dels plànols de fabricació permetent la correcta cohesió entre les diferents parts modulars projectades i assegurant la coherència de funcionament en el conjunt. Alhora permet identificar i corregir possibles errors o carències en els dissenys elaborats fins ara.

3.1. Selecció de components

A banda dels elements pròpiament dissenyats en el transcurs del projecte, i dels que se'n preveu la seva fabricació, el BAMC es compon també per un seguit d'elements comercials. La importància d'aquests, ja siguin normalitzats o no, s'equipara a la de les peces de fabricació pròpia, doncs el funcionament del braç de mesura en depèn d'igual manera.

3.1.1. Components normalitzats del muntatge

Els components normalitzats són aquells elements físics les característiques constructives dels quals s'estableix i es regula per mitjà d'una normativa determinada; és a dir, hi ha uns estàndards tècnics que asseguren la qualitat. En l'àmbit industrial europeu, els elements compresos sota l'abast de les normes ISO i DIN són els més habituals.

Per al desenvolupament del muntatge del BAMC es requereix d'una sèrie d'elements de subjecció no-permanent. La seva selecció ha vingut determinada per les dimensions i les sol·licitacions de cadascuna de les peces o parts del braç on intervenen. En la taula adjunta en l'apartat 4.5. *Llistat de peces* es recullen tots aquests elements, identificant la norma que obeeixen i les seves dimensions bàsiques. Tanmateix, la taula adjunta n'és una còpia.

Elements comercials normalitzats							
Denominació	Fotografia	Quantitat (unt.)	Proveïdor	Norma	Material (classe)	Mides (mm)	Pes (g)
Cargols encòder i base - corona		20	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 912	Acer galvanitzat (8.8)	M3x12	2
Cargols corona tubular - tubs PVC		12	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 912	Acer galvanitzat (8.8)	M4x50	6
Cargols passadors mecanisme cicloidal		12	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 912	Acer galvanitzat (8.8)	M4x45	5
Femella hexagonal M3		8	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 934	Acer galvanitzat (8.8)	M3	0,4

Femella hexagonal M4		12	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 934	Acer galvanitzat (8.8)	M4	0,6
Femella M4 autoblocant		8	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 985	Acer galvanitzat (8.8)	M4	0,8
Volandera M3		16	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 125 B	Acer AISI 304 (A2)	$\varnothing_{int}3,2$ (M3) $\varnothing_{ext}7$	0,25
Volandera M4		16	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 125 A	Acer AISI 304 (A2)	$\varnothing_{int}4,3$ (M4) $\varnothing_{ext}12$	0,5
Anella seguretat (Sege) exterior		1	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 471	Acer	$\varnothing_{eix}13$	1
Anella seguretat (Sege) interior		1	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 472	Acer	$\varnothing_{forat}35$	3
Rodament discs cicloïdals		6	XIKE	6700-ZZ	Acer	$\varnothing_{interior}10$ $\varnothing_{exterior}15$ Tol. H4	2
Rodament bases – eix cicloïdals		6	XIKE	688-2RS	Acer	$\varnothing_{interior}8$ $\varnothing_{exterior}16$ Tol. H5	6
Rodament eix SAP		2	XIKE	6806-2RS	Acer	$\varnothing_{interior}30$ $\varnothing_{exterior}42$ Tol. H7	25
Rodament SAP		1	XIKE	6002-2RS	Acer	$\varnothing_{interior}15$ $\varnothing_{exterior}32$ Tol. H9	29
Rodament corona cicloïdals - bases		6	XIKE	6810-2RS	Acer	$\varnothing_{interior}50$ $\varnothing_{exterior}65$ Tol. H7	53

Taula 11. Components normalitzats del BAMC

3.1.2. Components estructural de fabricació externa

A banda dels components normalitzats, en la construcció de l'estructura del BAMC es projecta la utilització de certs elements comercials, que no necessàriament obeeix a una norma concreta. Bàsicament, es tracta dels ens materials descrits a continuació. Les característiques particulars de cada component es troben en la taula adjunta corresponent en l'apartat 4.5. *Llistat de peces*.

a. Tub alumini

Per a la fabricació dels passadors d'alumini s'ha optat per partir d'un tub comercial d'aquest material de mesures estàndards. Això simplifica el procés de fabricació per tornejat; es pot introduir la longitud de tub en funció del nombre de passador desitjats en el torn, sempre que aquest incorpori tira-barres, i mecanitzar tot un lot de passadors alhora.

L'aliatge d'alumini escollit en aquest cas és l'Al 6061 T4, un dels més abundants en format comercial. Alhora, compta amb una relació cost-prestacions força favorable.

b. Tub PVC

L'estructura exterior del braç de mesura i, més concretament, els segments que uneixen les articulacions d'aquest, es projecten fabricats en tub comercial de policlorur de vinil (PVC). Així les operacions de fabricació es limiten al mecanitzat de tall i foradat en els punts corresponents. Alhora, la conformació tubular permet el pas del circuit electrònic pel seu interior i un pes molt reduït en relació al suport estructural que ofereix.

3.1.3. Components del circuit electrònic

Finalment, el BAMC requereix de tot un circuit electrònic per a poder realitzar-se el procés de mesura. Per al seu muntatge es necessita també d'un sèrie d'elements comercials concrets. Alguns d'aquests ja han estat exposats en apartats anteriors a causa de la seva implicació envers paràmetres concrets de disseny. En tot cas, les característiques de tots aquests components s'annexen a continuació.

1. Elements principals

a. Microcontrolador

El microcontrolador és la unitat de control i processament de dades del BAMC. És l'aparell encarregat de contenir i executar el software de mesura, coordinant l'acció dels diferents elements electrònics a través de la interacció entre l'usuari i el braç. Alhora, recopila les dades d'aquests elements i les interpreta en forma de coordenades que emmagatzema en un arxiu final. Així mateix, permet establir una interfície d'usuari estable a través de la seva pantalla tàctil incorporada. Les seves característiques principals s'han tractat en l'apartat 2.4.1. *Microcontrolador*. La seva selecció s'ha basat, parcialment, en la disponibilitat de suficients entrades digitals com per connectar els 4 encòders (8 senyals d'entrada) i el polsador (1 senyal d'entrada) de forma simultània.

b. Encóder

L'encóder és la unitat funcional bàsica de les articulacions del BAMC i l'aparell en el que es basa tot el funcionament del braç. A partir de la recopilació del moviment angular efectuat en cadascuna dels parells de revolució permeten calcular la posició final del palpador. En aquest cas, s'han instal·lat 4 encòders (articulacions A, B, C i D) de tipus òptic i incremental, amb dos canals de sortida de senyal. S'implementen en precisió quàdruple per mitjà del software de mesura per permetre una major exactitud en la mesura i la detecció del sentit de gir. Les seves característiques principals s'han tractat en l'apartat 2.4.2. *Encóder òptic*.

c. Polsador

A banda del microcontrolador, és l'únic element funcional que permet la disposició d'una interfície d'usuari per establir la interacció entre el BAMC i l'operador. La seva activació permet l'inici i el final del procediment de mesura, entre altres tasques de control. És tracta d'un polsador de la marca fabricant *GUUZI*, de simple efecte, amb retorn automàtic i de tipus normalment obert. Alhora, la seva conformació metàl·lica roscada possibilita la instal·lació en el manipulador del SAP. Permet corrents de fins a 3 A i 250 V. Alhora, està fabricat en metall (llautó niquelat) i és impermeable (protecció IP65). De forma cilíndrica, té un diàmetre de 12 mm i una longitud total de 21 mm i la seva fixació es realitza per mitjà d'una rosca longitudinal a tot el seu cos.

El polsador permet elegir el programa o software de mesura a executar i iniciar el propi procediment de mesura un cop s'ha determinat el punt geomètric d'interès per mitjà del SAP.

2. Elements auxiliars

d. Cablejat

El cablejat és el conjunt de material conductor en forma de fil que possibilita la connexió i la comunicació entre els diferents elements electrònics. Alhora, incorpora un recobriments plàstic aïllant, que impedeix el contacte del material conductor amb l'exterior, evitant-se problemes de curtcircuits, transmissions tèrmiques, etc. En aquest cas s'ha optat per un conductor de coure estanyat, de la marca *HUAZIZ*, d'un diàmetre força petit (26AWG, $0,13 \text{ mm}^2$); les intensitats que transcorren a través del circuit són mínimes (de l'ordre dels mA). Es tracta d'un cable multifilar amb seccions combinades de 0,08 m i amb un recobriments aïllant que combina el cautxú amb la silicona. Això permet un voltatge màxim de fins a 600 V, molt llunyà a les tensions utilitzades en aquest projecte.

e. Pins de connexió

Per a la connexió dels diferents elements electrònics principals i perifèrics amb les entrades digitals del microcontrolador, s'ha requerit de la introducció de diversos segments de cable que incorporen un extrem acabat amb un pin de connexió metàl·lic i rígid. Es tracta del sistema d'ancoratge a pins que utilitzen la majoria de plaques de prova i aparells electrònics (*Arduino*, *Elegoo*, etc.). Compten amb un diàmetre de 0,55 mm (calibre 26) pel sistema *SWG* (*Standard Wire Gauge*). Aquests segments s'han unit per soldadura amb els terminals dels diferents elements electrònics per possibilitar la connexió amb l'*M5Core2*.

f. Element de protecció d'unions elèctriques

Per a la protecció de les unions elèctriques s'ha optat per utilitzar fundes plàstiques termoretràctils de poliolefina. Aquests elements de la marca *Htbakoi* tenen la funció d'evitar que les soldadures quedin exposades a l'ambient i que contactin entre elles o amb altres elements del BAMC. Són ignífugs, impermeable i aïllants (15 kV/mm). Alhora, ofereixen un cert reforç en termes d'estabilitat de la unió amb una resistència tensional de fins a 10,4 MPa. La seva aplicació resulta convenient i ràpida, i els diàmetres en què es presenten varien en funció del tipus de connexió (diàmetre del cable, element a connectar, etc.). Necessiten una temperatura propera als 110°C per ser instal·lats, tanmateix, compten amb un interval de temperatures de funcionament sense degradació d'entre -55°C i 125°C.

g. Resistència

La resistència elèctrica seleccionada s'utilitza en la connexió de tipus *Pull-Down* en el polsador del manipulador (SAP) del braç. La seva funció és la de limitar (definir) el corrent mínim que passa cap al pin d'entrada al microcontrolador. Així doncs, evita lectures errònies del polsador. S'ha optat per una resistència de 1 k Ω ($\pm 1\%$ tol.) per limitar-ne l'autoritat sense comprometre al pas de corrent evitant una conseqüent generació de calor excessiva per efecte Joule. En aquest cas s'ha seleccionat una resistència del fabricant *Elegoo*.

h. Condensador

El condensador instaurat en el circuit es situa en paral·lel al polsador del SAP com a mesura de *debounce* per hardware; és a dir, té la funció de filtrar el senyal elèctric produït quan es prem o s'allibera el polsador per evitar lectures errònies per part del microcontrolador. La capacitat

seleccionada (1 μ F) és la recomanada per la bibliografia general [11] per contrarestar el soroll en aplicacions simples com la projectada.

Elements comercials electrònics							
Denominació	Fotografia	Quantitat (unt.)	Proveïdor	Codi comercial (model)	Material	Mides i caracte. (mm)	Pes (g)
Encòder òptic incremental		4	Yosoo Health Gear (GTEACH)	LPD3806-600BM-G5-24N	-	5-24 V; 600 div., 2 fases (canals).	140
Microcontrolador		1	M5Stack	M5Core2	-	Micro ESP32	52
Polsador		1	GUUZI	G160	Llautó niquelat, Policarbonat (PC)	12x9x21 mm 2 A, 12/24/125/250 V Cos roscat amb contrafemella incorporada IP65 (impermeable) Normalment obert	5
Resistència		1	ELEGOO	ES-EL-CK-004	-	1 k Ω Tol. \pm 1% Pins 0,55 mm #24 SWG	0,1
Condensador		1	DollaTek	B07DJ517WL	Alumini (Al)	50 V 1 μ F Pins 0,55 mm #24 SWG	0,2
Cablejat		4,2 m	HUAZIZ	26AWG	Coure (Cu) estanyat (Sn) Silicona	600 V màx. Multifilar 0,08 mm Aïllant cautxú silicona calibre 26 (0,13 mm ² , 26AWG)	-
Protectors termoretràctils		35	Htbakoi	GTN2929	Poliolefina	Termoretràctil Ignífug Impermeable T ³ inici contracció +70°C T ³ contracció completa +110°C T ³ funcional -55/+125°C Cof., contracció 2:1 Resis. dielèctrica 15 kV/mm Resis. tensió 10,4 MPa	-

Taula 12. Components electrònics del braç

3.2. Descripció del muntatge del BAMC

En aquest punt de la memòria, ja es coneixen cadascun dels components materials que conforma la totalitat del braç de mesura, ja siguin de fabricació pròpia, comercials o normalitzats. Per tant, es pot passar a projectar les condicions de muntatge que permeten obtenir un prototip funcional de BAMC. En aquest apartat de l'Enginyeria de Detall es tenen en consideració els diferents detalls constructius envers, per exemple, les unions entre les peces; també s'analitzen de forma descriptiva les soldadures del circuit electrònic i la lubricació entre elements mecànics amb mobilitat relativa. Tanmateix, les instruccions seguides en el muntatge s'especifiquen en l'apartat 5. *Plec de Condicions.*

3.2.1. Unions mecàniques semi-permanents

La majoria d'unions entre les peces modulars que formen el BAMC es realitzen per mitjà de sistemes semi-permanents de caire mecànic. L'avantatge principal que tenen aquests sistemes és la preservació de la individualitat, la integritat i la forma de cadascuna de les peces després del muntatge. Alhora, permeten el canvi dels diferents elements modulars de forma localitzada i convenient. Així mateix, presenten una elevada resistència als esforços per la seva construcció i els materials dels que es formen.

En la següent taula (*Taula 11*) s'enumeren les diferents unions, els elements que s'hi apliquen per a mantenir la conformació estructural i les peces que hi intervenen.

3.2.2. Unions mecàniques per pressió

Un dels elements funcionals i dinàmics que més s'han implementat al llarg de la construcció del BAMC són els rodaments de boles o coixinets de rodolament. Aquests s'han implementat en totes les situacions per pressió entre dues peces diferenciades, possibilitant-ne el moviment relatiu de rotació entre elles. Tanmateix, les toleràncies dimensionals que permeten aquests ajusts es recullen en l'apartat apartat 4.3. *Plànols d'especejament*.

En la taula adjunta (*Taula 11*) es recullen les diferents unions per pressió i els elements i peces que hi intervenen.

Unió	Tipologia unió	Elements normalitzats	Unitats	Peces unides
Base	Fixa	Cargol DIN 912 M3x12	8	Base – Corona base
		Femella DIN 934 M3	8	
		Volandera DIN 125 B M3	16	
Articulació A	Parell de revolució	Cargol DIN 912 M4x45	4	Corona base – Discs cicloidal inf. i sup. – Corona acoblament base – Tapa simple encóder – Passadors – Eix cicloidal
		Femella hexagonal DIN 934 M4	4	
		Rod. 670-ZZ	2	
		Rod. 688-2RS	2	
		Rod. 6810-2RS	2	
Articulacions B i C	Parell de revolució	Cargol DIN 912 M4x45	4	Corona acoblament base – Discs cicloidal inf. i sup. – Tapa doble encóder – Tapa doble simple - Passadors – Eix cicloidal
		Femella hexagonal DIN 934 M4	4	
		Rod. 670-ZZ	2	
		Rod. 688-2RS	2	
		Rod. 6810-2RS	2	
Articulació D	Parell de revolució	Rod. 6806-2RS	2	Eix SAP – Tapa SAP encóder – Tapa SAP simple
Articulació E	Parell de revolució	Rod. 6002-2RS	1	Eix SAP – Cos SAP
		Seger DIN 471 d13	1	
		Seger DIN 472 D35	1	
Encóders 1, 2, 3 i 4 (A, B, C, D)	Fixa	Cargol DIN 912 M3x12	3	Encóder – Tapa simple encóder
Inici i final tubs PVC	Fixa	Cargol DIN 912 M4x50	2	Tapa doble encóder – Tapa doble simple – Tub PVC
		Femella autoblocant DIN 985 M4	2	

		Volandera DIN 125 A M4	4	
--	--	------------------------	---	--

Taula 13. Unions mecàniques semi-permanents i per pressió del BAMC

3.5.3. Connexions elèctriques

Totes les connexions elèctriques del circuit electrònic projectat (4.7. *Esquema de muntatge electrònic*) s'han elaborat per mitjà de soldadura d'estany després del trenat dels terminals a connectar. Alhora, totes les connexions s'han protegit per mitjà de segments de tub termoretràctil, del diàmetre requerit en cada cas, per reforçar la unió i evitar contactes no desitjats que podrien provocar curtcircuits.

En les zones d'especial fricció entre el cablejat i elements estructurals perifèrics, com a les entrades i sortides dels tubs de PVC, per exemple, també s'han inclòs segments de tub termoretràctil per evitar el desgast excessiu del recobriment aïllant dels cables. Igualment, en les zones en que el cablejat queda a la vista, com a les interseccions causades per la presència d'una articulació, s'han recollit tots els terminals per mitjà també de tubs termoretràctils millorant l'estètica global exterior del BAMC.

Per a veure amb major detall les peculiaritats de les unions elèctriques del circuit cal llegir l'apartat 5. *Plec de Condicions*.

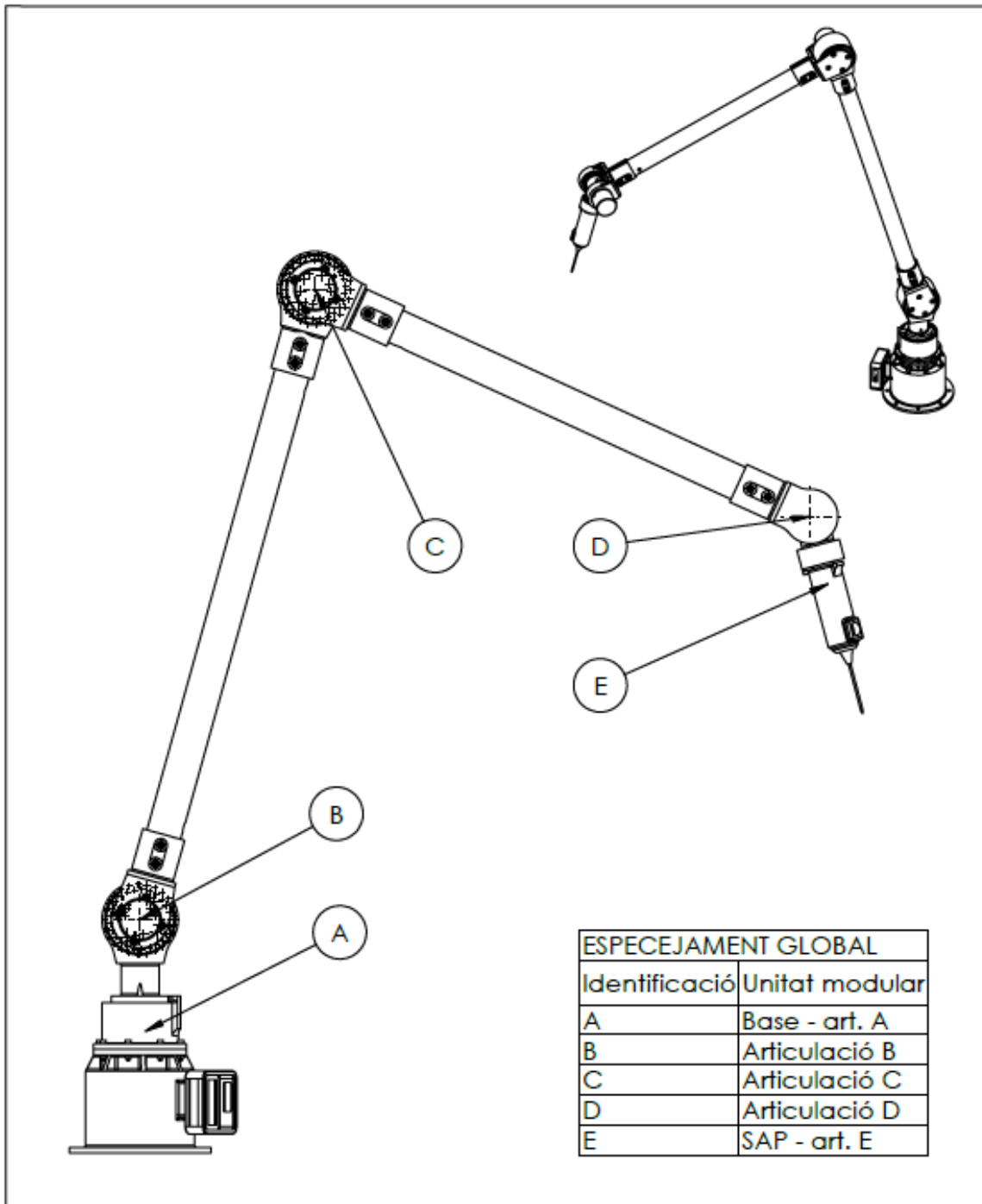
4. Plànols

L'etapa final de l'Enginyeria de Detall culmina amb la generació de la documentació gràfica (tècnica) necessària per a la fabricació del prototip de BAMC projectat. Així doncs, en aquest apartat de la memòria es presenten un seguit de plànols i diagrames que permeten el pas des d'un disseny conceptual a un ens tangible i material.

4.1. Llistat de plànols

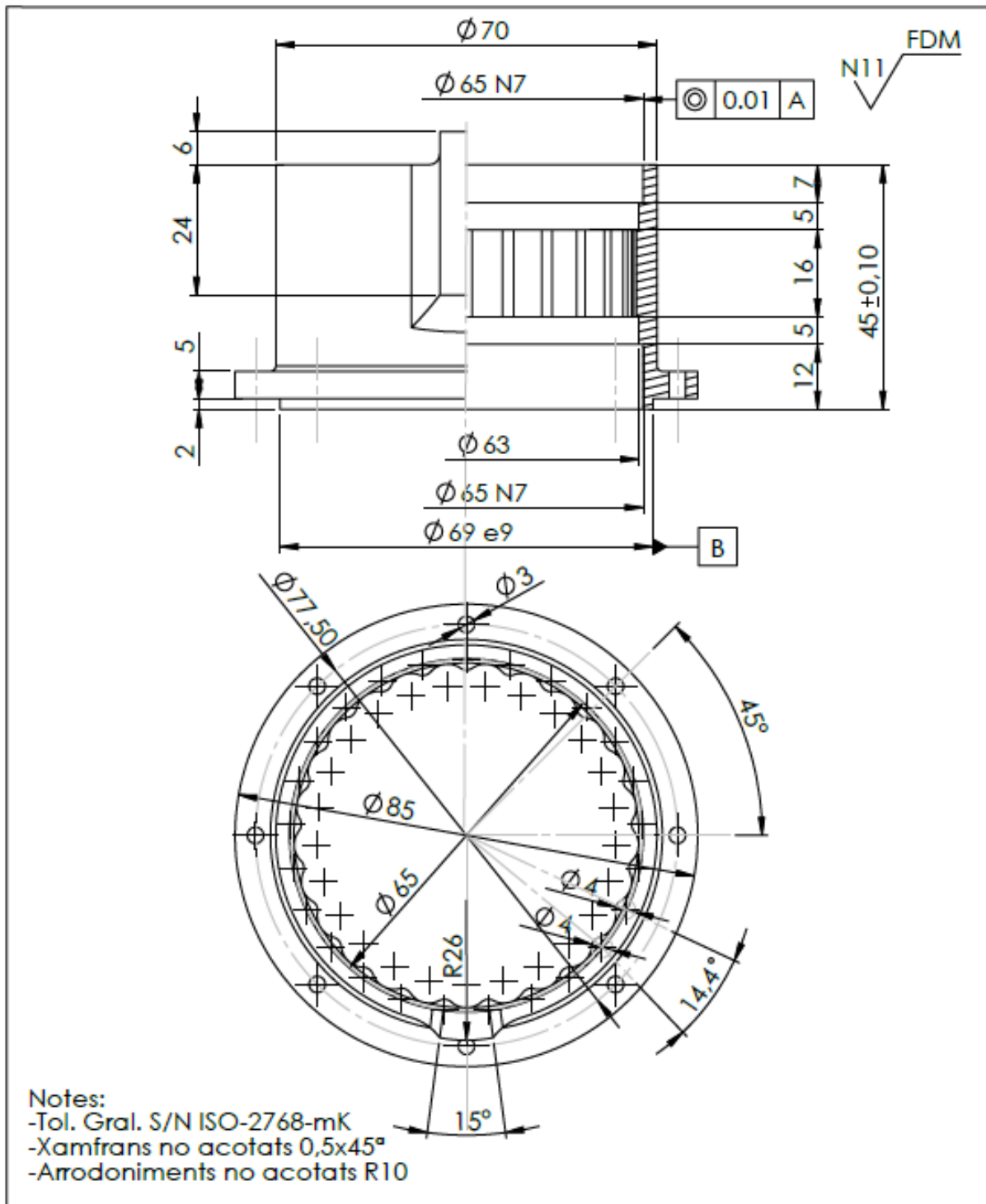
4.2.Plànol de conjunt	136
4.3.Plànols individuals	137
4.4.Llistat de peces	154
4.5.Esquema de muntatge del circuit electrònic	159

4.2. Plànol de conjunt

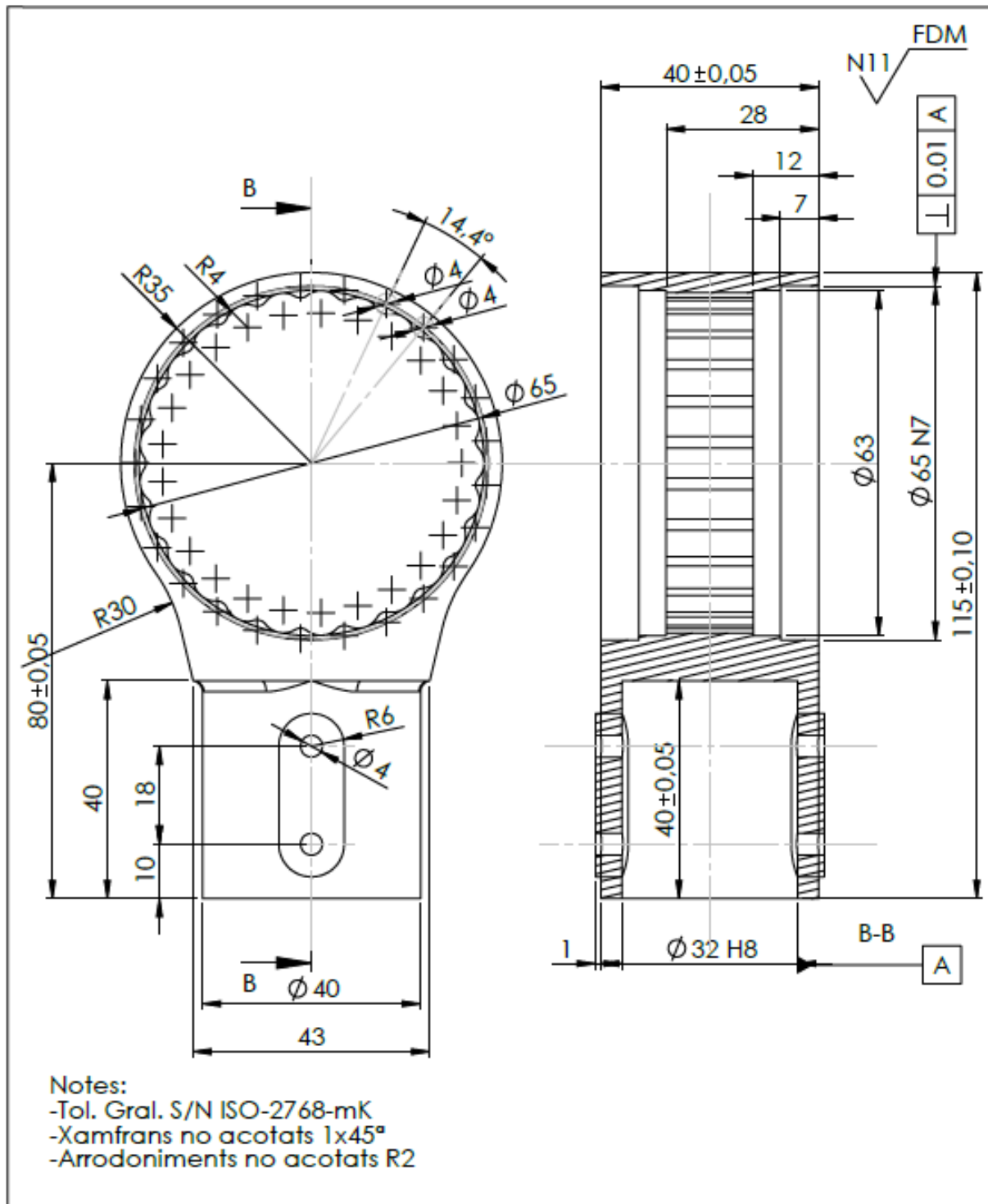


ESPECEJAMENT GLOBAL	
Identificació	Unitat modular
A	Base - art. A
B	Articulació B
C	Articulació C
D	Articulació D
E	SAP - art. E

Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú		
Elaboració	Data	Cognoms, Nom			
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel			
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica			
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020			
Projecció	Peça i codificació			Projecte	BAMC MTV1.0
Escala 1:5	Unitats modulares BAMC			Material	-
				Fabricació	-
				Pes	-

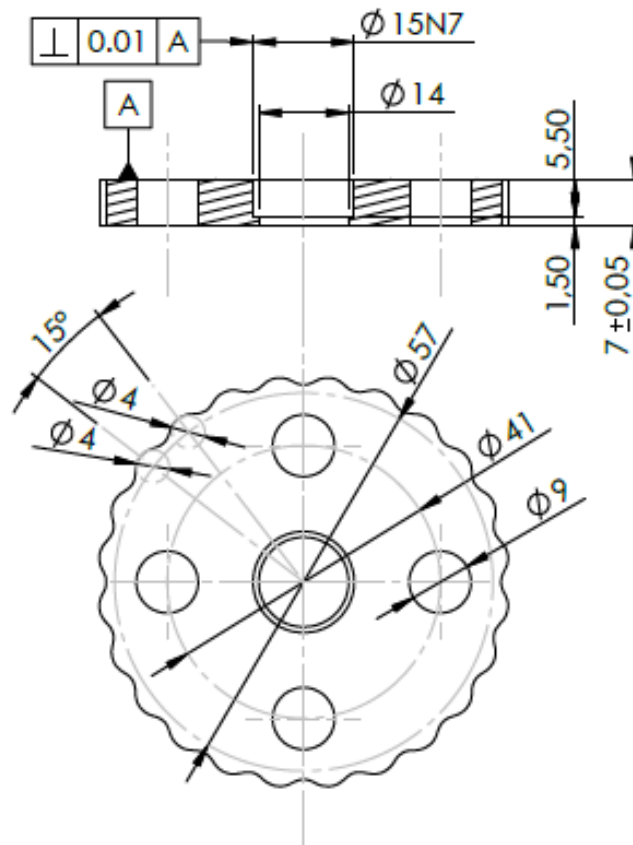


Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú		
Elaboració	Data	Cognoms, Nom			
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel			
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica			
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020		Projecte	BAMC MTV1.0
Projecció	Peça i codificació		Material	PLA	
Escala	Corona base		Fabricació	Impressió 3D (FDM)	
1:1			Pes	54,8 g	



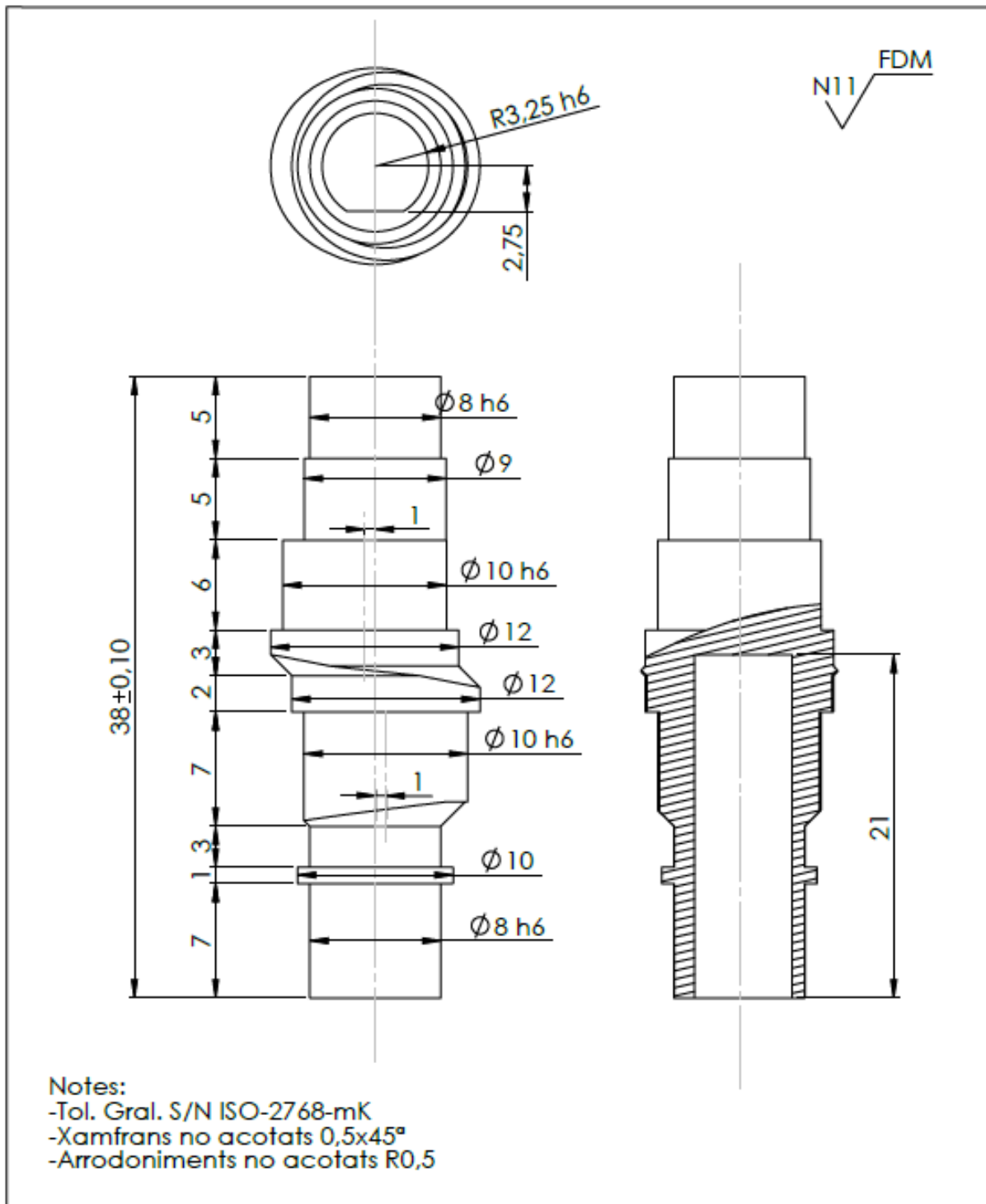
Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH</p> <p>Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú</p>	
Elaboració	Data	Cognoms, Nom		
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel		
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica		
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020		
Projecció	Peça i codificació		Projecte	BAMC MTV1.0
<p>Escala 1:1</p>	<h2>Corona acoblament tubular</h2>		Material	PLA
			Fabricació	Impressió 3D (FDM)
			Pes	94,8 g

N11 FDM

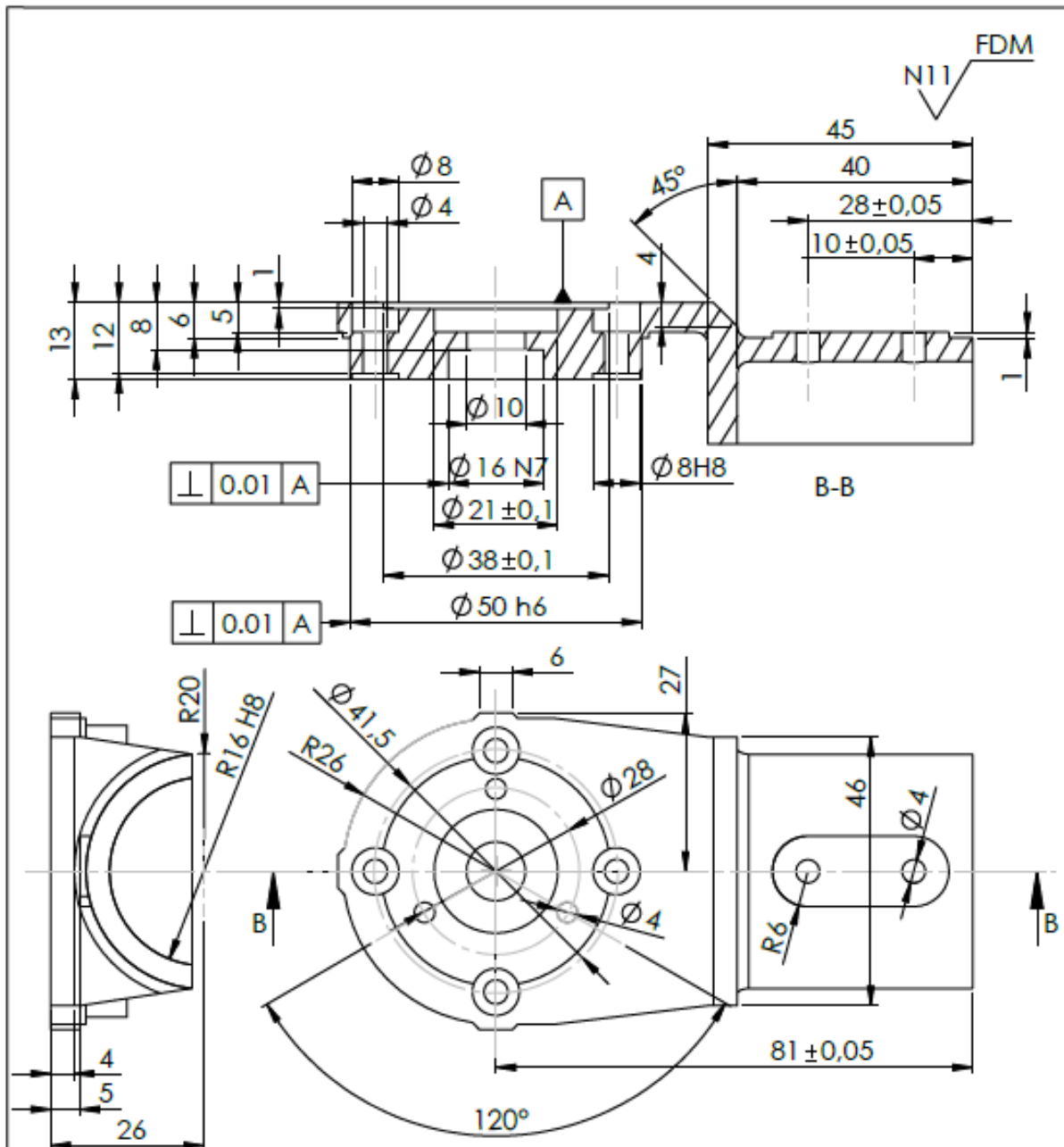


Notes:
-Tol. Gral. S/N ISO-2768-mK
-Xamfrans no acotats $0,5 \times 45^\circ$
-Arrodoniments no acotats R0,5

Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH</p> <p>Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú</p>		
Elaboració	Data	Cognoms, Nom			
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel			
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica			
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020			
Projecció	Peça i codificació		Projecte	BAMC MTV1.0	
<p>Escala 1:1</p>	<h2>Discs cicloïdals</h2>		Material	PLA	
			Fabricació	Impressió 3D (FDM)	
			Pes	23,9 g	

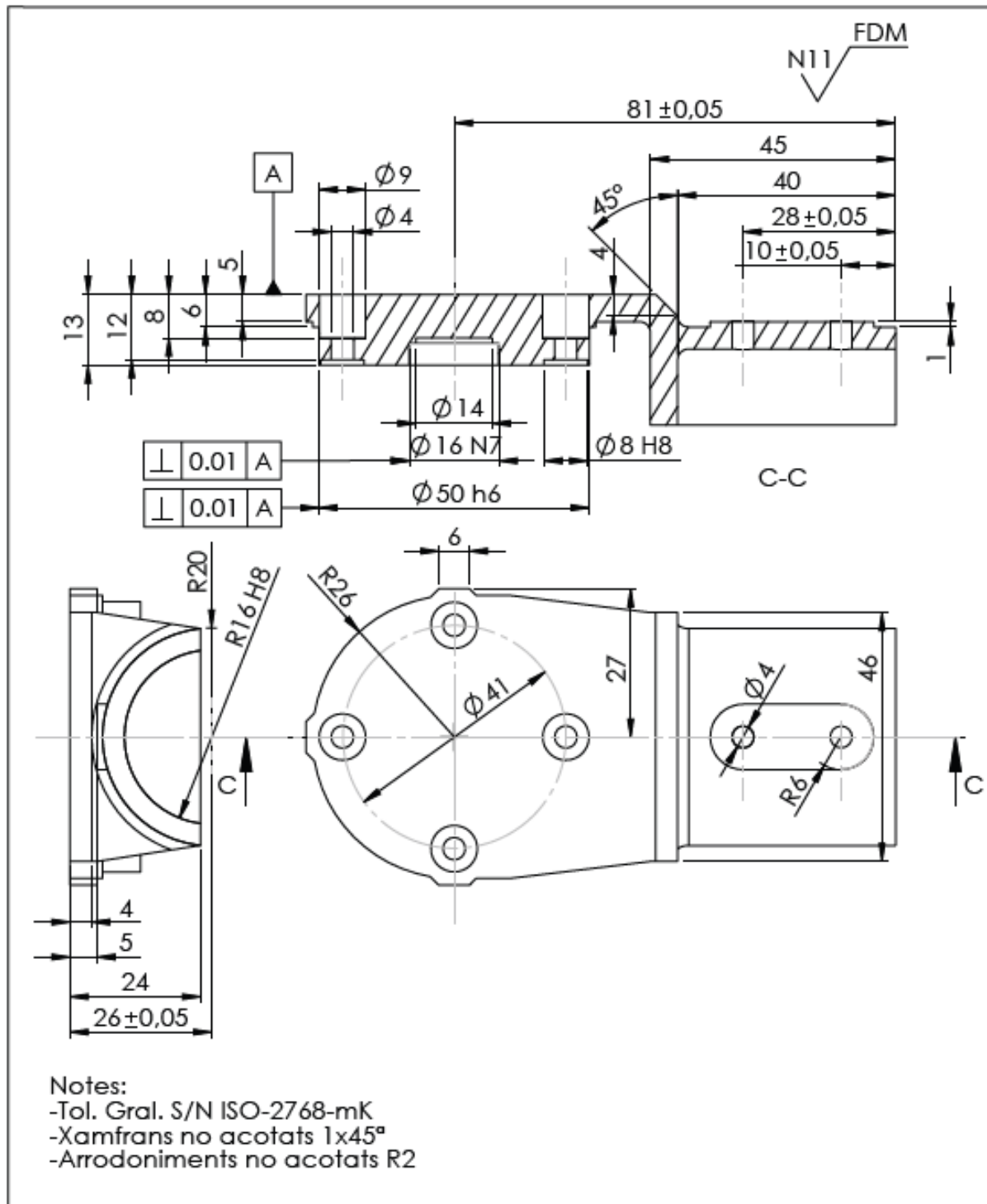


Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú			
Elaboració	Data	Cognoms, Nom			Projecte	BAMC MTV1.0
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel			Material	PLA
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica			Fabricació	Impressió 3D (FDM)
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020			Pes	3,1 g
Projecció	Peça i codificació					
	<h2>Eix excèntric</h2>					
Escala 3:1						

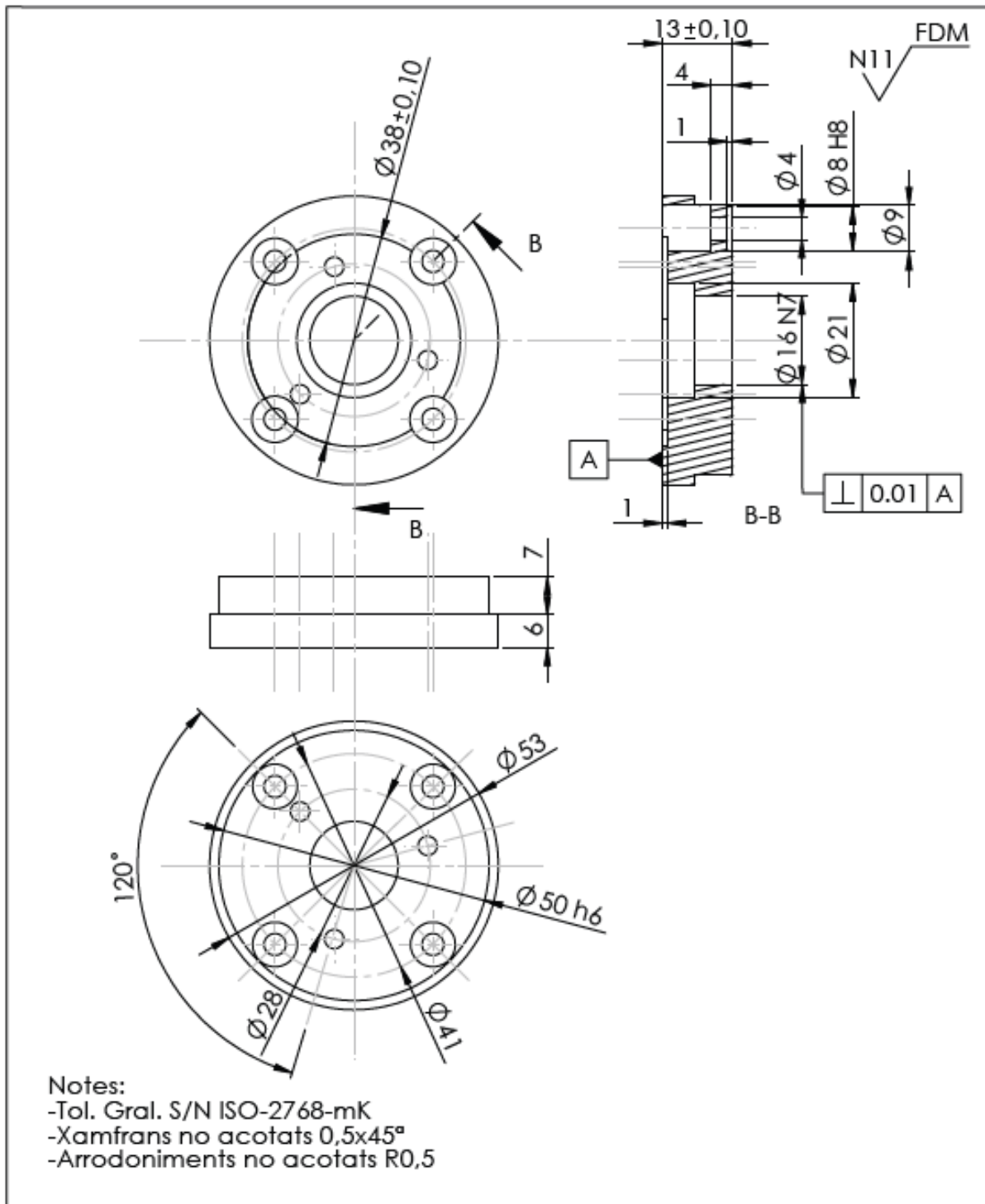


Notes:
-Tol. Gral. S/N ISO-2768-mK
-Xamfrans no acotats 1x45°
-Arrodoniments no acotats R2

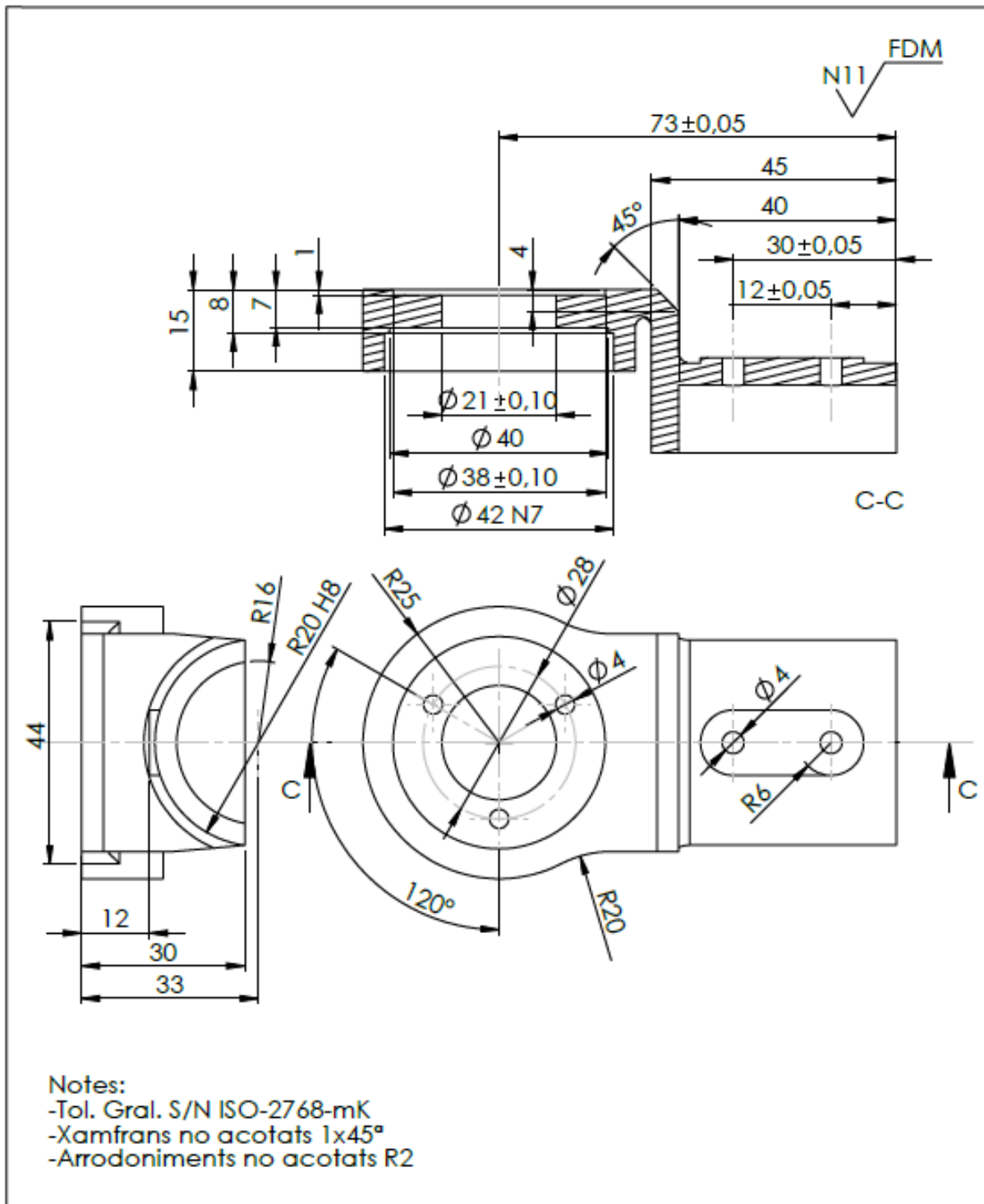
Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú		
Elaboració	Data	Cognoms, Nom			
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel			
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica			
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020			
Projecció	Peça i codificació				
Escala 1:1	<h2>Tapa doble encóder</h2>			Projecte	BAMC MTV1.0
				Material	PLA
				Fabricació	Impressió 3D (FDM)
				Pes	53,1 g



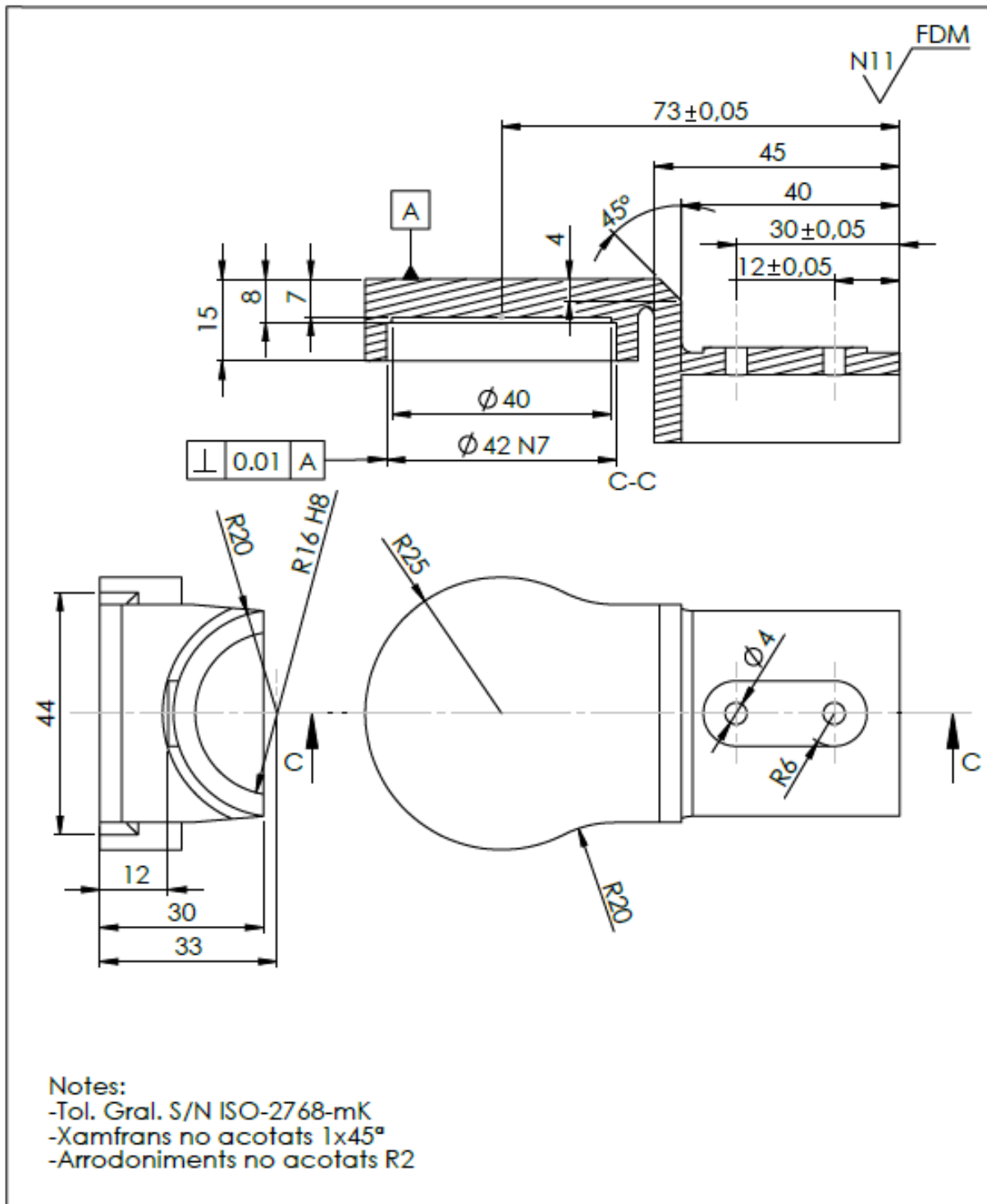
Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú		
Elaboració	Data	Cognoms, Nom			
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel			
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica			
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020		Projecte	BAMC MTV1.0
Projecció	Peça i codificació		Material	PLA	
	<h2>Tapa doble simple</h2>		Fabricació	Impressió 3D (FDM)	
Escala			1:1	Pes	57,2 g



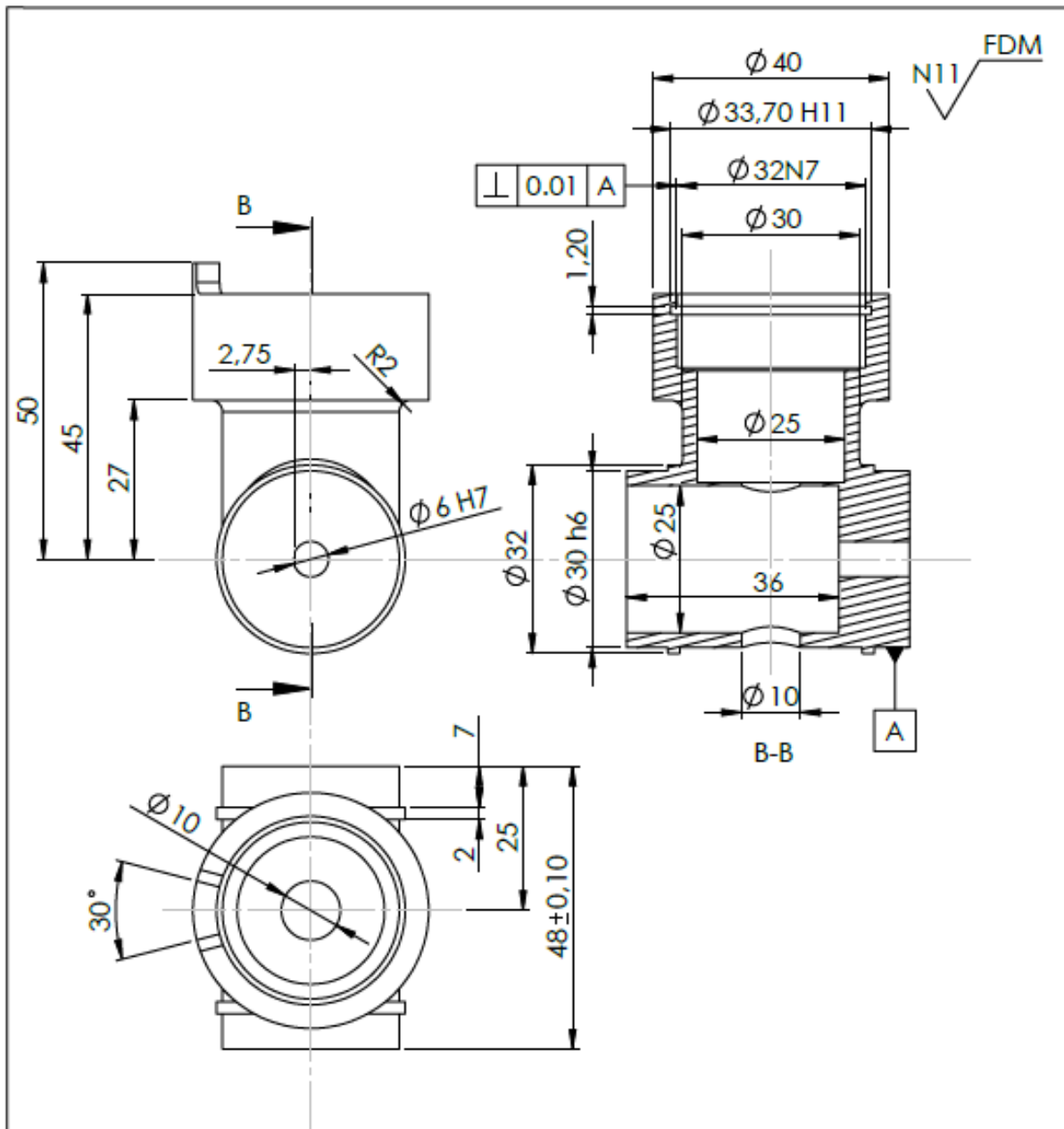
Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH</p> <p>Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú</p>	
Elaboració	Data	Cognoms, Nom		
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel		
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica		
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020		
Projecció	Peça i codificació		Projecte	BAMC MTV1.0
Escala 1:1	Tapa simple encóder		Material	PLA
			Fabricació	Impressió 3D (FDM)
			Pes	33,2



Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH</p> <p>Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú</p>		
Elaboració	Data	Cognoms, Nom			
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel			
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica			
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020			
Projecció	Peça i codificació		Projecte	BAMC MTV1.0	
 Escala 1:1	<h2>Tapa SAP encóder</h2>		Material	PLA	
			Fabricació	Impressió 3D (FDM)	
			Pes	47,3 g	

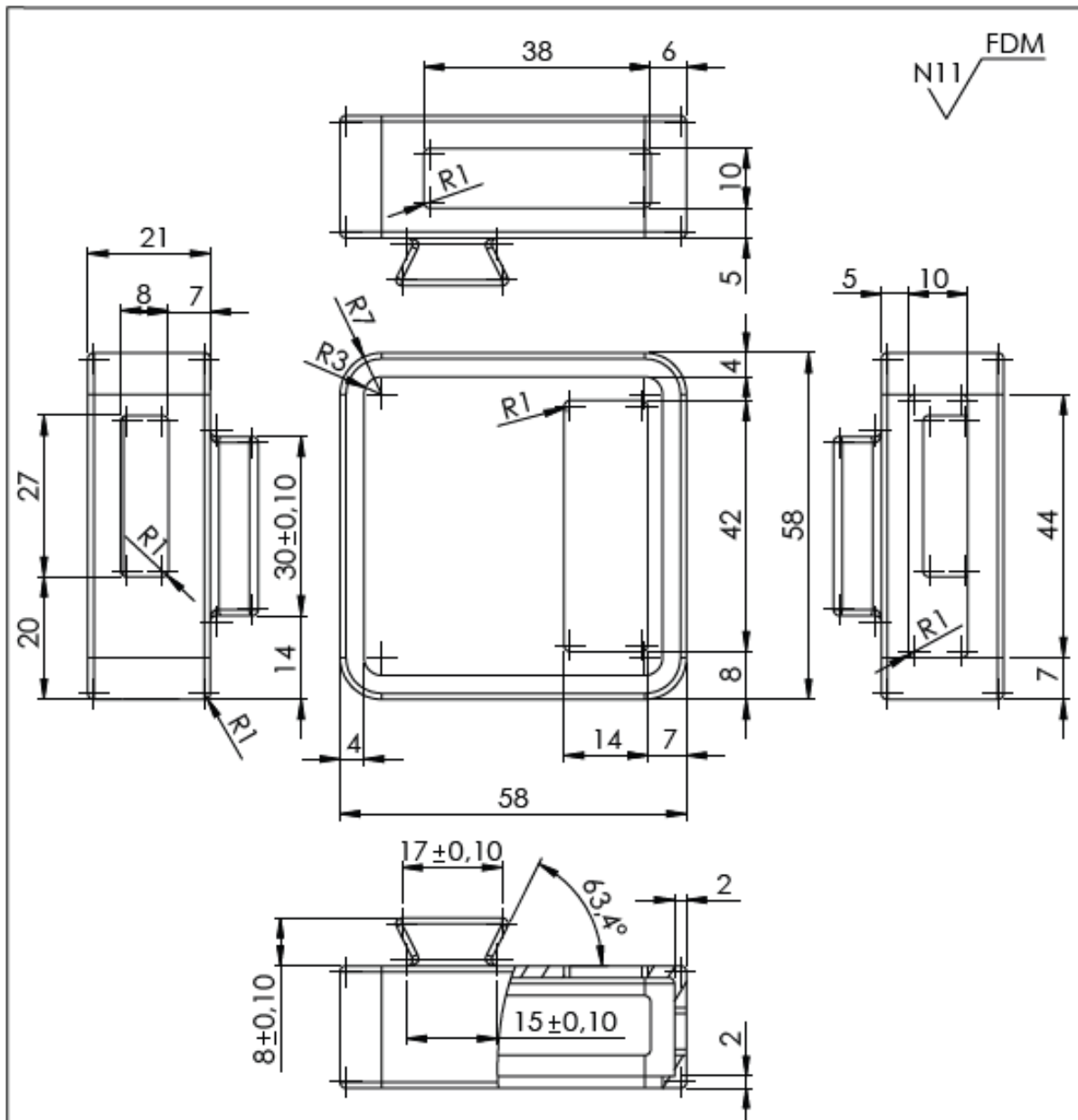


Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONITÈCH</p> <p>Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú</p>	
Elaboració	Data	Cognoms, Nom		
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel		
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica		
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020		
Projecció	Peça i codificació		Projecte	BAMC MTV1.0
<p>Escala 1:1</p>	<h2>Tapa SAP simple</h2>		Material	PLA
			Fabricació	Impressió 3D (FDM)
			Pes	42,4 g



Notes:
-Tol. Gral. S/N ISO-2768-mK
-Xamfrans no acotats $0,5 \times 45^\circ$
-Arrodoniments no acotats R2

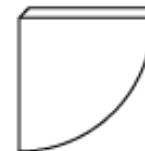
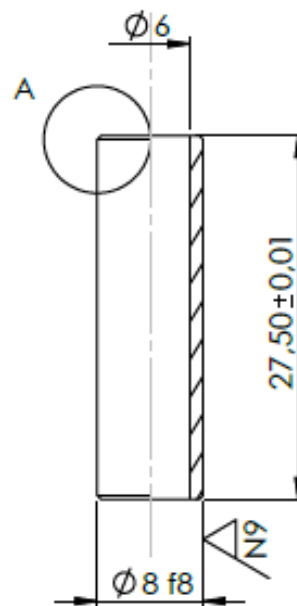
Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú		
Elaboració	Data	Cognoms, Nom			
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel			
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica			
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020		Projecte	BAMC MTV1.0
Projecció	Peça i codificació		Material	PLA	
	Eix SAP		Fabricació	Impressió 3D (FDM)	
Escala			1:1	Pes	88,3 g



- Notes:
 -Tol. Gral. S/N ISO-2768-mK
 -Xamfrans no acotats 0,5x45°
 -Arrodoniments no acotats R1
 - Carcassa parets 2 mm

Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú		
Elaboració	Data	Cognoms, Nom			
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel			
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica			
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020			
Projecció	Peça i codificació				
Escala 1:1	<h2>Carcassa microcontrolador</h2>			Projecte	BAMC MTV1.0
				Material	TPU
				Fabricació	Impressió 3D (FDM)
				Pes	30,8 g

N10/ (N9/)

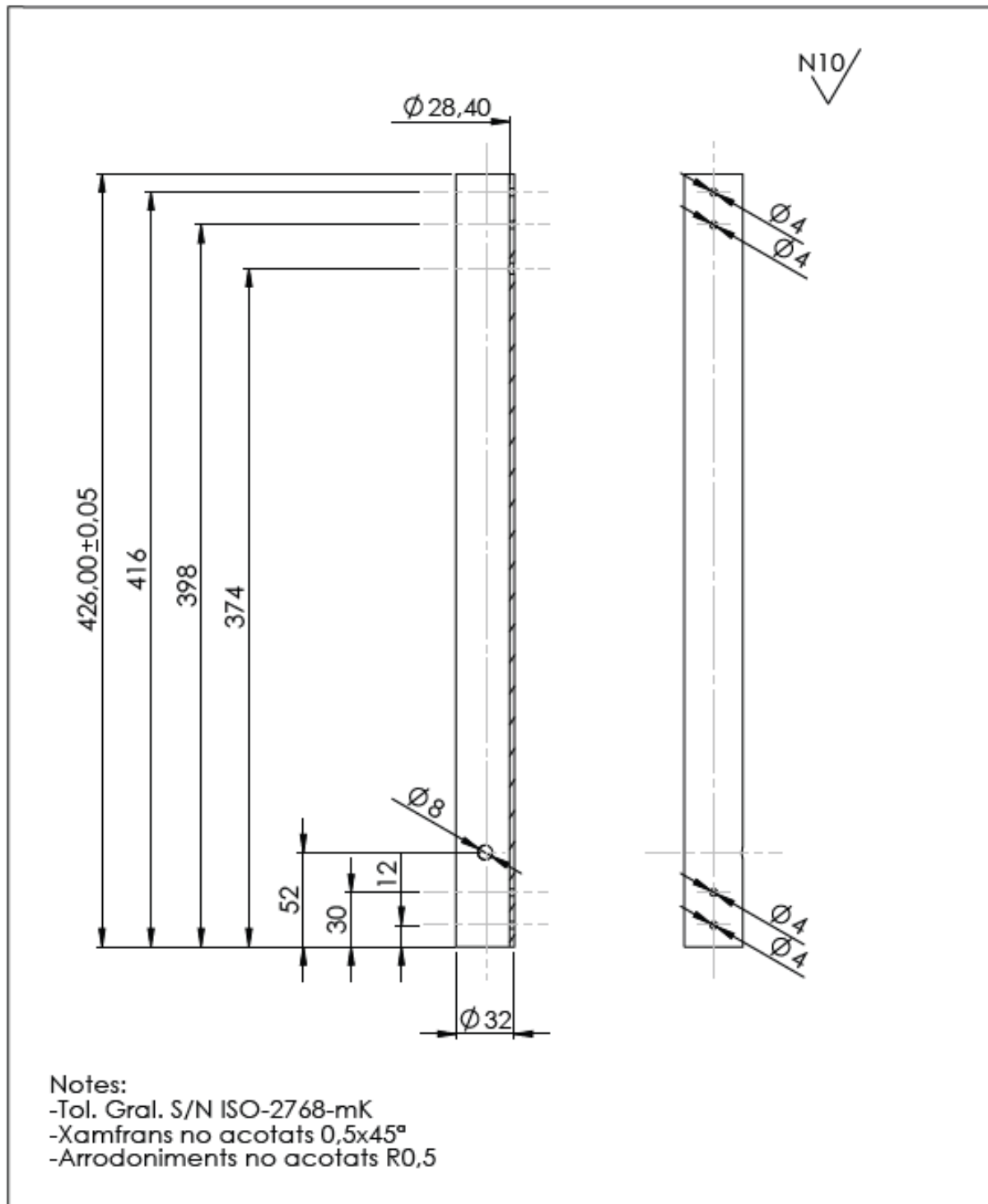


A (5:1)

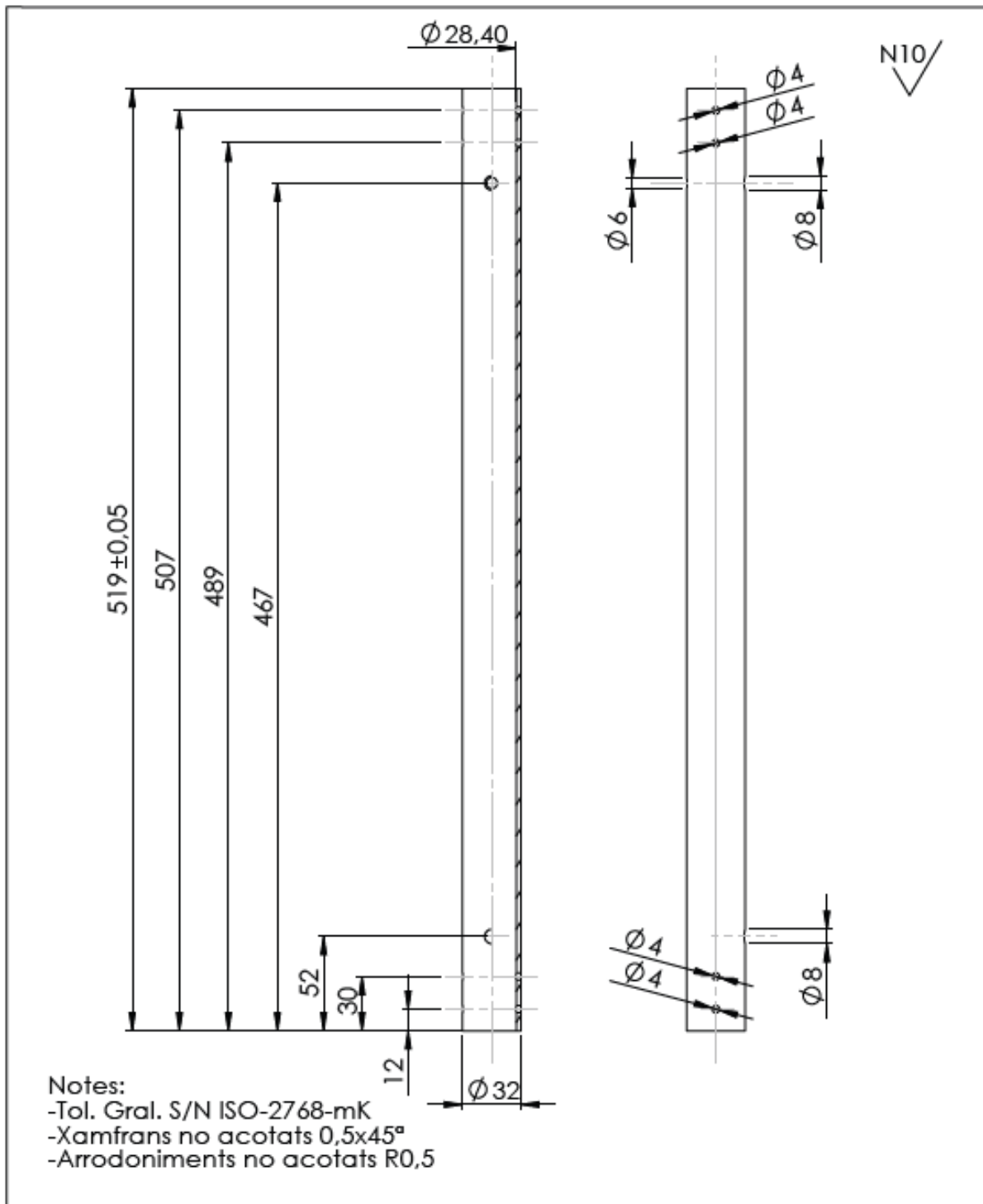
Notes:

- Tol. Gral. S/N ISO-2768-mK
- Xamfrans no acotats 0,5x45°
- Arrodoniments no acotats R0,5

Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú		
Elaboració	Data	Cognoms, Nom			
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel			
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica			
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020		Projecte	BAMC MTV1.0
Projecció	Peça i codificació		Material	Al 6061-T4	
	Passador		Fabricació	Mecanitzat (torn)	
Escala			Pes	1,6 g	
2:1					



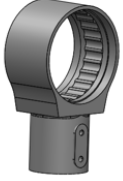





Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú		
Elaboració	Data	Cognoms, Nom			
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel			
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica			
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020			
Projecció	Peça i codificació		Projecte	BAMC MTV1.0	
	<h2>Tub PVC curt</h2>		Material	PVC	
Escales			Fabricació	Mecanitzat	
1:3			Pes	147,7 g	

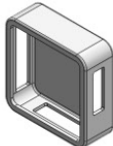

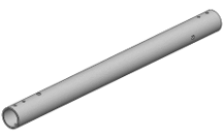




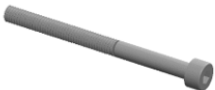





Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2			UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú									
Elaboració	Data	Cognoms, Nom										
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel	<table border="1"> <tr> <td>Projecte</td> <td>BAMC MTV1.0</td> </tr> <tr> <td>Material</td> <td>PVC</td> </tr> <tr> <td>Fabricació</td> <td>Mecanitzat</td> </tr> <tr> <td>Pes</td> <td>181,2 g</td> </tr> </table>		Projecte	BAMC MTV1.0	Material	PVC	Fabricació	Mecanitzat	Pes	181,2 g
Projecte	BAMC MTV1.0											
Material	PVC											
Fabricació	Mecanitzat											
Pes	181,2 g											
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica										
Norma	05/07/23	UNE-EN ISO 128-1:2020										
Projecció	Peça i codificació		<table border="1"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Tub PVC llarg</td> </tr> <tr> <td>Material</td> <td>PVC</td> </tr> <tr> <td>Fabricació</td> <td>Mecanitzat</td> </tr> </table>		Tub PVC llarg		Material	PVC	Fabricació	Mecanitzat		
Tub PVC llarg												
Material	PVC											
Fabricació	Mecanitzat											
Escala 1:3												

4.4. Llistat de peces






Peces fabricació pròpia							
Denominació	Fotografia	Quantitat (unt.)	Material	Mides (mm)	Pes (g)	Procés de fabricació	Acabat
Base		1	PLA	-	203,2	MDF	Polit i lacat en vernís transparent, mate
Corona base		1	PLA	-	54,8	MDF	Polit i lacat en vernís transparent, mate
Tapa simple encóder		1	PLA	-	33,2	MDF	Polit i lacat en vernís transparent, mate
Corona acoblament base		1	PLA	-	113,8	MDF	Polit i lacat en vernís transparent, mate
Tapa doble encóder		2	PLA	-	53,1	MDF	Polit i lacat en vernís transparent, mate
Tapa doble simple		2	PLA	-	57,2	MDF	Polit i lacat en vernís transparent, mate


Corona acoblament tubular		1	PLA	-	94,8	MDF	Polit i lacat en vernís transparent, mate
Disc cicloidal sup.		3	PLA	-	23,9	MDF	Rebavat
Disc cicloidal inf.		3	PLA	-	23,9	MDF	Rebavat
Eix excèntric		3	PLA	-	3,1	MDF	Rebavat
Tapa SAP encòder		1	PLA	-	47,3	MDF	Polit i lacat en vernís transparent, mate
Tapa SAP simple		1	PLA	-	42,4	MDF	Polit i lacat en vernís transparent, mate
Eix SAP		1	PLA	-	88,3	MDF	Polit i lacat en vernís transparent, mate
Cos SAP (manipulador)		1	PLA	-	156,2	MDF	Polit i lacat en vernís transparent, mate


Carcassa microcontrolador		1	TPU	-	30,6	MDF	Rebavat
Passador		12	Al. 6061 T4	$\phi_{ext}8$ $\phi_{int}6$ L27,5	1,6	Mecanitzat	Rebavat i polit
Tub PVC curt*		1	PVC	$\phi_{ext}32$ $\phi_{int}28,4$ L426	147,7	Mecanitzat	Rebavat
Tub PVC llarg*		1	PVC	$\phi_{ext}32$ $\phi_{int}28,4$ L519	161,2	Mecanitzat	Rebavat

Elements comercials normalitzats							
Denominació	Fotografia	Quantitat (unt.)	Proveïdor	Norma	Material (classe)	Mides (mm)	Pes (g)
Cargols encòder i base - corona		20	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 912	Acer galvanitzat (8.8)	M3x12	2
Cargols corona tubular - tubs PVC		12	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 912	Acer galvanitzat (8.8)	M4x50	6
Cargols passadors mecanisme cicloidal		12	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 912	Acer galvanitzat (8.8)	M4x45	5
Femella hexagonal M3		8	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 934	Acer galvanitzat (8.8)	M3	0,4
Femella hexagonal M4		12	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 934	Acer galvanitzat (8.8)	M4	0,6
Femella M4 autoblocant		8	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 985	Acer galvanitzat (8.8)	M4	0,8
Volandera M3		16	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 125 B	Acer AISI 304 (A2)	$\phi_{int}3,2$ (M3) $\phi_{ext}7$	0,25

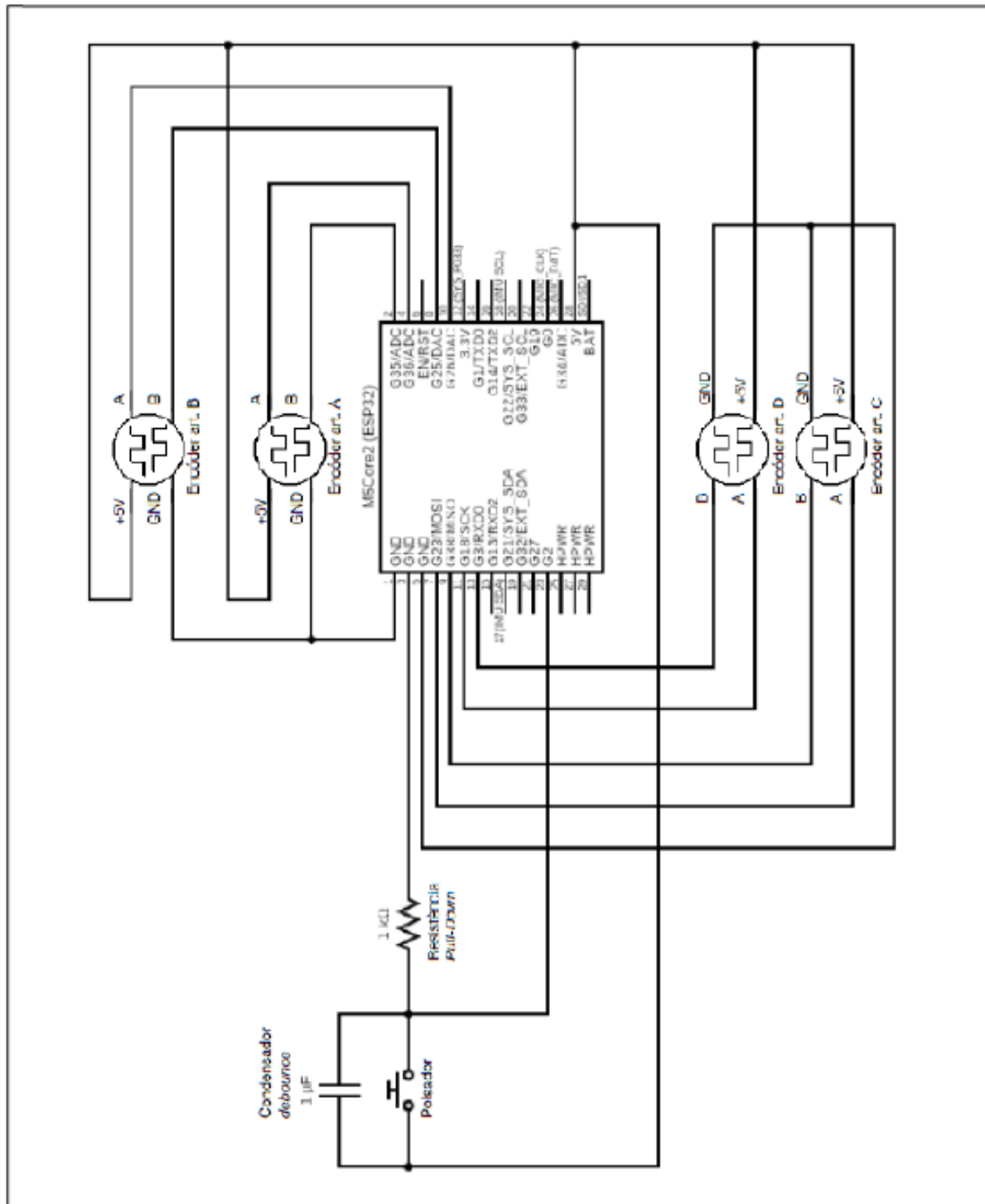
Volandera M4		16	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 125 A	Acer AISI 304 (A2)	Ø _{int} 4,3 (M4) Ø _{ext} 12	0,5
Anella seguretat (Sege) exterior		1	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 471	Acer	Ø _{eix} 13	1
Anella seguretat (Sege) interior		1	Tornilleria Malagueña S.C.A	DIN 472	Acer	Ø _{forat} 35	3
Rodament discs cicloïdals		6	XiKe	6700-ZZ	Acer	Ø _{interior} 10 Ø _{exterior} 15 Tol. H4	2
Rodament bases – eix cicloïdals		6	XiKe	688-2RS	Acer	Ø _{interior} 8 Ø _{exterior} 16 Tol. H5	6
Rodament eix SAP		2	XiKe	6806-2RS	Acer	Ø _{interior} 30 Ø _{exterior} 42 Tol. H7	25
Rodament SAP		1	XiKe	6002-2RS	Acer	Ø _{interior} 15 Ø _{exterior} 32 Tol. H9	29
Rodament corona cicloïdals - bases		6	XiKe	6810-2RS	Acer	Ø _{interior} 50 Ø _{exterior} 65 Tol. H7	53

Elements comercials electrònics							
Denominació	Fotografia	Quantitat (unt.)	Proveïdor	Codi comercial (model)	Material	Mides i caracte. (mm)	Pes (g)
Encòder òptic incremental		4	Yosoo Health Gear (GTEACH)	LPD3806-600BM-G5-24N	-	5-24 V; 600 div., 2 fases (canals).	140
Microcontrolador		1	M5Stack	M5Core2	-	Micro ESP32	52
Polsador		1	GUUZI	G160	Llautó niquelat, Policarbonat (PC)	12x9x21 mm 2 A, 12/24/125/250 V Cos roscat amb contrafemella incorporada IP65 (impermeable) Normalment obert	5
Resistència		1	ELEGOO	ES-EL-CK-004	-	1 kΩ Tol. ±1% Pins 0,55 mm #24 SWG	0,1
Condensador		1	DollaTek	B07DJ517WL	Alumini (Al)	50 V 1 µF Pins 0,55 mm #24 SWG	0,2

Cablejat		4,2 m	HUAZIZ	26AWG	Coure (Cu) estanyat (Sn) Silicona	600 V màx. Multifilar 0,08 mm Aïllant cautxú silicona calibre 26 (0,13 mm ² , 26AWG)	-
Protectors termoretràctils		35	Htbakoi	GTNZ929	Poliolefina	Termoretràctil Ignífug Impermeable T ³ inici contracció +70°C T ³ contracció completa +110°C T ³ funcional -55/+125°C Cof ₂ contracció 2:1 Resis. dielèctrica 15 kV/mm Resis. tensió 10,4 MPa	-

Altres							
Denominació	Fotografia	Quantitat (unt.)	Proveïdor	Codi comercial (model)	Material	Mides i caracte. (mm)	Pes (g)
Palpador SAP		1	CCLKHY	-	Acer inox.	Ø2x60	0,75

4.5. Esquema de muntatge del circuit electrònic



Treball Final d'Estudis - Grau en Enginyeria Mecànica, Curs 2022-23 Q2		
Elaboració	Data	Cognoms, Nom
Alumne	05/07/23	Tuduri Benejam, Miquel
Director	05/07/23	Solé Rovira, Joan - Dpt. Enginyeria Mecànica
Norma	05/07/23	-
Projecció	Peça i codificació	
Escales	<h2>Diagrama muntatge circuit electrònic</h2>	
-		
-		
-		

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

Projecte	BAMC MTV1.0
Material	-
Fabricació	-
Pes	-

5. Plec de Condicions

El Plec de Condicions esdevé un dels deu documents o carpetes bàsiques del projecte. És la part de la memòria que estableix les condicions tècniques, econòmiques, administratives i legals possibilitant que l'objecte d'estudi, el braç articulat de mesura en aquest cas, es pugui materialitzar en les condicions especificades; és una forma d'evitar interpretacions alternatives a les projectades. Així doncs, l'objectiu immediat és el d'acotar degudament el procediment de fabricació i muntatge del BAMC dissenyat, caracteritzant i parametritzant els diferents elements que componen el prototip. Aquest apartat és el pont que connecta els paràmetres de disseny descrits fins ara amb el producte final. Alhora, es dictaminen un seguit de procediments i valors d'ajusts que cal respectar. En aquest apartat s'utilitzarà un llenguatge concís i directe a fi d'agilitar la comprensió dels paràmetres i evitar ambigüitats no desitjades. La justificació dels paràmetres definits i les peculiaritats de disseny ja s'han anat exposant de forma detallada en apartats previs de la memòria que, quan resulti convenient, seran degudament referenciats.

5.1. Normativa envers els braços de mesura

Els braços de mesura per coordenades, tot i englobar-se dintre del marc global industrial, també compten amb una normativa partícula pròpia. Bàsicament, aquestes són les directives a les que cal referir-se:

- a. **UNE-EN ISO 10360-12:2016:** aquesta norma internacional estableix els requeriments generals per a l'exactitud i la repetibilitat de braços de mesura tridimensional portàtils equipats amb sonda de contacte; aborda els requeriments específics per a aquests dispositius així com els seus procediments de prova i calibratge.
- b. **ISO/TS 15530-1:2013:** aquesta norma introdueix especificacions de producte i procediments de calibratge per a diversos equipaments de mesura (màquines *CMM*, *GPS*, etc.) incloent els braços de mesura tridimensional.
- c. **UNE-EN ISO/IEC 17025:2017:** aquesta és una norma que es refereix als requisits generals per a la competència dels laboratoris d'assaig i calibratge. Així doncs, regula les proves i la calibratge en laboratoris de proves. Si els braços de mesura es calibren en laboratoris, els laboratoris mateixos han de complir amb els requeriments d'aquesta norma per a garantir la competència tècnica i la qualitat dels calibratges.
- d. **Directiva 2006/42/CE (Reial Decret 1644/2008, de 10 d'octubre):** aquesta legislació pròpia de la Unió Europea, i publicada en el BOE número 246, de 11/10/2008, estableix les normes per a la comercialització i la posada en servei de màquines i elements industrials. Coneguda com «Directiva de Màquines», proporciona definicions, obligacions del fabricant, avaluacions de conformitat i permet l'etiquetat pel marcat CE de qualitat industrial. També recull la documentació tècnica necessària i la informació i formació necessària dels usuaris d'un aparell.

5.2. Normativa tècnica particular

A banda de l'ens projectat, del BAMC, els processos de fabricació empleats i els elements comercials també estan regits per una sèrie de normes d'abast divers. Així doncs, dintre del marc legislatiu

aplicat a la indústria a nivell nacional i internacional hi ha diverses directives que cal respectar a l'hora de desenvolupar un projecte d'enginyeria com l'actual.

5.2.1. Fabricació per impressió 3D (FDM)

La impressió tridimensional, sobretot en el seu format FDM, és una tecnologia en creixement que ha donat lloc a una sèrie de normatives i estàndards per assegurar la qualitat, la seguretat i la interoperabilitat dels productes impresos en 3D. Les normatives rellevants que cal avaluar són les annexades.

- a. **DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03:** aquesta sèrie de normatives han estat desenvolupades conjuntament per l'Organització Internacional de Normalització (ISO) i l'ASTM (anteriorment coneguda com *American Society for Testing and Materials*) sota la denominació «*Additive manufacturing*». Cobreixen diversos aspectes de les tecnologies de fabricació per addició, incloent la impressió 3D, regulant-ne la terminologia, els procediments de prova, els requeriments de qualitat i alguns mètodes de caracterització.
- b. **UNE-EN ISO 19650-1:2019:** aquesta normativa és més específica per a la gestió de la informació en projectes d'enginyeria o de construcció que utilitzen BIM (*Building Information Modelling*), però també pot ser rellevant per a projectes que utilitzen la impressió tridimensional per FDM com a part del procés

5.2.2. Fabricació per mecanitzat

Els processos de fabricació per mecanitzat estan subjectes a diverses normatives i estàndards que regulen la qualitat, la seguretat i l'eficiència de la producció. Algunes de les normatives rellevants que poden afectar als processos de fabricació per mecanitzat es revisen aquí.

- a. **UNE-EN ISO 9001:2015:** aquesta és una norma internacional de gestió de la qualitat que es pot aplicar a tots els processos de fabricació, inclosos els processos de mecanitzat. Estableix els requeriments per a un sistema de gestió de la qualitat efectiu i és utilitzada per assegurar la qualitat i la consistència dels productes fabricats.
- b. **ISO 45001:2018:** per adreçar els riscos per a la seguretat i la salut ocupacional en els processos de mecanitzat projectats, aquesta norma pot ser rellevant. Està relacionada amb la seguretat i la salut laboral en els processos industrials de fabricació més habituals.

5.2.3. Components de fabricació externa

Els components comercials o de fabricació externa que s'han empleat per a la construcció del BAMC es veuen igualment sotmesos a les regulacions i els estàndards de diverses normatives d'aplicació general.

5.2.3.1. Components normalitzats

La normativa que regula els cargols i altres sistemes de fixació varia segons la regió i l'ús previst dels mateixos. Algunes de les normatives i els estàndards més comuns que poden afectar aquests elements en la fabricació industrial en el territori europeu s'inclouen a continuació.

- a. **Normes ISO (*International Organization for Standardization*)**: les normes ISO, desenvolupades per l'Organització Internacional d'Estandardització, inclouen una àmplia gamma de normatives relacionades amb els cargols, les roques i les peces de fixació semi-permanent. Les normes més conegudes són la ISO 898 (per a cargols i roques de resistència mecànica), la ISO 4762 (per a cargols amb caps hexagonals), i la ISO 15243 (per rodaments).
- b. **Estàndards DIN (*Deutsches Institut für Normung*)**: els estàndards DIN, desenvolupats per l'Institut Alemany de Normalització, són àmpliament utilitzats a Alemanya i altres països europeus. Aquestes normes també engloben especificacions i normalitzacions per a cargols, roques i altres peces de fixació. En el present projecte, és l'estàndard de components industrials que més s'ha usat.

5.2.3.2. Components electrònics

Els elements electrònics utilitzats per formar el circuit de funcionament del BAMC, com a productes industrials individuals, es fabriquen sota les directrius i indicacions de diverses normatives.

- a. **UNE-EN ISO 9001:2015**: aquesta és una norma internacional de gestió de la qualitat que es pot aplicar a tots els processos de fabricació, inclosos els processos de mecanitzat. Estableix les bases per a la gestió de la qualitat en els processos de fabricació i desenvolupament de productes, incloent-hi els circuits electrònics. Encara que no sigui específica per a circuits electrònics, es pot aplicar per millorar la qualitat dels processos de disseny i fabricació.
- b. **Directiva 2006/42/CE (Reial Decret 1644/2008, de 10 d'octubre)**: aquesta legislació pròpia de la Unió Europea, i publicada en el BOE número 246, de 11/10/2008, estableix les normes per a la comercialització i la posada en servei de màquines i elements industrials. Així doncs, si es consideren els components electrònics com màquines industrials unitàries, aquestes han de complir amb les directives i els estàndards europeus aplicables, com ara la Directiva de Baixa Tensió (LVD) i la Directiva de Compatibilitat Electromagnètica (EMC). Aquestes directives defineixen requeriments de seguretat elèctrica i electromagnètica per als productes electrònics.
- c. **Criteris de l'IEC (*International Electrotechnical Commission*)**: aquesta comissió tècnica internacional desenvolupa i publica estàndards internacionals relacionats amb l'electrònica, incloent-hi els estàndards per a components electrònics i seguretat elèctrica. Tanmateix, la seva aplicació es recull en la Directiva 2006/42/CE exposada abans.

5.3. Adaptació de la normativa a l'abast del projecte

Tot i el conjunt de la normativa exposada, cal prendre consciència de l'abast del projecte desenvolupat i dels característiques del BAMC construït. El braç projectat no va dirigit a la comercialització ni a la producció en sèrie, a priori. Alhora, les tecnologies, els processos de fabricació i les metodologies d'assaig emprades tenen una validesa i un recorregut industrial limitat. Per tant, no totes les normatives exposades són d'obligat compliment; l'aplicabilitat d'algunes altres, directament, resulta inviable.

Tanmateix, la normativa seguida i aplicada parcial o totalment es recull en la següent taula resum (*Taula 14*):

Àmbit d'aplicació	Normativa	Òrgan regulador
General (industrial)		
BAMC	UNE-EN ISO 10360-12:2016	UNE/ISO
	Directiva 2006/42/CE (Reial Decret 1644/2008)	Ministeri d'Indústria / Comissió Europea d'Indústria
Processos fabricació		
Impressió per FDM	DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03	ISO/ASTM
Elements comercials		
Normalitzats	Normes ISO	ISO
	Estàndards DIN	DIN
Electrònics	Directiva 2006/42/CE (Reial Decret 1644/2008)	Ministeri d'Indústria / Comissió Europea d'Indústria

Taula 14. Normatives aplicades al present projecte

5.4. Modelat per deposició fosa (FDM)

En aquest punt del Plec de Condicions es defineix el procés de fabricació utilitzat majoritàriament en el present projecte; també es caracteritza l'aparell utilitzat per la impressió FDM i s'especifiquen la metodologia seguida i els paràmetres d'impressió aplicats. Tot això assegura unes condicions de fabricació òptimes i un conseqüent resultat satisfactori en les peces.

5.4.1. Tipologia d'impressora FDM

El dispositiu utilitzat per a fabricar gran part dels components estructurals que conformen el braç de mesura tridimensional projectat és una impressora comercial d'impressió 3D per la tècnica de modelat per deposició fosa amb filament. Concretament es tracta del model *Ender-3 V2 Neo*, el més recent dels dispositius de la marca fabricant asiàtica *Creality*.

És un aparell compacte i senzill, amb unes dimensions d'impressió de 220x220x250 mm, un funcionament i una interfície d'usuari molt intuïtiva i un sol conjunt extrusor – fusor. Per tant, només permet la impressió en un sol tipus de material per cada configuració. El seu funcionament, com acostuma a ser habitual en impressores comercials d'aquesta índole, es basa en el desplaçament del fusor a través de l'eix vertical i un dels horitzontals (biaxial) a través d'un braç horitzontal mòbil i gràcies a de la propulsió de motors pas a pas. Alhora, el llit, base o plataforma d'impressió compta amb el desplaçament a través de l'eix paral·lel al sòl restant (uniaxial) en base a la mateixa tecnologia. Contràriament al que és habitual, la unitat d'extrusió, encarregada d'impulsar el filament a través del fusor, es troba distanciada d'aquest i fixada en un dels laterals del braç o eix horitzontal mòbil. El posicionament dels elements mòbils es controla a través d'interruptors de final de carrera, per interferència física o contacte, doncs. L'estructura que sustenta totes les parts funcionals està fabricada en un aliatge lleuger d'alumini lacat en negre i compta amb una sèrie de peus fabricats en alguna mena d'elastòmer que permeten l'assentament ferm de la base així com l'absorció de possibles vibracions provocades en l'entorn.

Tot i les seves prestacions, es tracta d'un model destinat a l'àmbit domèstic, fet que s'evidencia per les velocitats d'impressió moderades i les notables toleràncies de fabricació.

D'entre les particularitats més destacables presenta un sistema operatiu innovador que junt amb una placa base remodelada i uns motor de major qualitat permeten una notable reducció del soroll durant el funcionament i una major suavitat de moviments. Igualment, disposa d'un sistema d'autonivellament de plataforma d'impressió per contacte, el que facilita molt el procés de preparació.

En la següent taula (*Taula 15*) es recullen la majoria d'especificacions tècniques a partir de la informació proporcionada directament pel fabricant:

Especificacions generals	
Marca	<i>Creality</i>
Model	<i>Ender-3 V2 Neo</i>
Dimensions d'impressió	220x220x250 mm
Tecnologia d'impressió	MDF
Nombre de fusors	1
Altura de capa	0,1-0,4 mm
Diàmetre de fusor	0,4 mm (estàndard)
Precisió	±0,1 mm
Materials d'impressió	PLA/PET/ABS/TPU
Formats suportats	GCODE/STL/OBJ/AMF
Comunicació	Targeta microSD
Voltatge d'alimentació	100-120 V~; 200-240 V~, 50/60 Hz
Potència nominal	350 W
Temperatura de plataforma	≤100°C
Temperatura de fusor	≤250°C
Autonivellament	Sí, per contacte (<i>CR Touch</i>)
Velocitat d'impressió	≤120 mm/s (50 mm/s recomanada)

Taula 15. Especificacions de la impressora 3D utilitzada

5.4.1.1. Tipus de plataforma i base

La impressora utilitzada disposa d'una plataforma d'impressió equipada amb tecnologia *PCB* (*printed circuit board*) recoberta per una placa metàl·lica magnètica que aporta rigidesa i planitud, així com un escalfament més uniforme de la superfície d'impressió. Aquest tipus de base s'alimenta a 24V, pel que la potència d'escalfament és considerable. El circuit resistiu encarregat d'augmentar-ne la temperatura queda a la part superior d'aquesta planxa, optimitzant-se el procés d'augment de temperatura.

La implementació d'una plataforma magnètica permet la utilització d'una superfície o base d'impressió magnètica en els processos d'impressió projectats. Així doncs, s'utilitzarà una làmina magnètica i flexible fabricada en acer de molla endurit per tractament tèrmic i recoberta de pols de PEI (politerimida) per facilitar l'adherència de les peces impreses sense comprometre'n la posterior separació. Aquesta configuració permet la separació de la base envers la plataforma un cop acabada una impressió per poder desenganxar fàcilment les peces modelades per flexió. Alhora, se'n permet l'ús per ambdues cares. Malauradament, aquest recobriments rugós polimèric es pot malmetre fàcilment a causa d'un mal calibratge o anivellament, afectant negativament al funcionament global de l'aparell si no es soluciona.

5.4.1.2. Software i formats de comunicació

En el procés de fabricació de modelat per deposició fosa (FDM) hi intervenen diferents programaris i formats d'arxiu que possibiliten comunicació entre ells. Aquests ja s'han descrit de forma detallada en l'apartat 1.5.1. *Impressió tridimensional*. En el present apartat s'estableixen quin són els softwares i formats utilitzats durant el desenvolupament de les diferents etapes de la impressió (*Taula 16*).

Etapa	Funció	Software	Format arxius		Suport (canal)
1. Modelat 3D	Generació d'un model computacional en 3D per cada peça; definició de la forma i les dimensions.	SolidWorks (CAD)	Entrada	c.	d.
			Sortida	.stl (STL)	Ordinador
2. Segmentació	Definició de l'orientació de les capes i dels paràmetres d'impressió; creació dels suports.	UltiMaker Cura (slicer)	Entrada	.stl (STL)	Ordinador
			Sortida	.gcode	microSD
3. Impressió	Modelat material de la peça tridimensional.	Intern de la impressora	Entrada	.gcode	MicroSD
			Sortida	e.	f.

Taula 16. Formats de transmissió dels arxius entre dispositius implicats

5.4.2. Preparació de la impressora

Així com ho fa la *Ender-3 V2 Neo*, la gran majoria d'impressores tridimensionals de filament disponibles en el mercat permeten realitzar impressions visualment correctes i coherents en la seva configuració predeterminada. Tanmateix, un aspecte visual coherent no equival a una tolerància dimensional correcta; l'exactitud constructiva esdevé un aspecte especialment rellevant en la fabricació d'una màquina de mesura com el BAMC projectat. Desviacions dimensionals de l'ordre de les dècimes de mil·límetre en els components impresos, a banda d'afectar directament a les mesures que s'obtidran amb el braç articulat, poden desembocar en jocs no desitjats, acoblaments impossibles, interferències entre peces i un mal funcionament en general. A fi d'evitar tot això, en aquest apartat es recull detalladament un procediment ideat per assegurar l'obtenció impressions d'elevada exactitud dimensional (tolerància de fabricació reduïda) envers el model projectat a través del software CAD.

5.4.2.1. Anivellament de la plataforma d'impressió

En aquest cas, l'anivellament de la plataforma d'impressió és farà per dues metodologies diferents, manualment i automàtica, per assegurar la màxima precisió en el procés de fabricació. El model d'impressora tridimensional utilitzat en aquest projecte, com ja s'ha esmentat, és el *Creality Ender 3 V2 Neo*, l'aparell més recent de la gamma *Ender 3*. Tanmateix, els procediments i metodologies descrits a continuació són aplicables, amb més o menys adaptacions, a qualsevol model comercial d'impressora 3D.

a. Anivellament manual

L'anivellament manual serà el primer en realitzar-se, i requereix d'una sèrie de passes que s'han de seguir de forma acurada:

1. Posada en marxa de la impressora i posicionament del capçal en la posició d'espera (*home position*). Cal seguir el següent directori des de la pantalla inicial *Prepare – Auto home*.
2. Situar una fulla de paper blanc (La majoria de marques comercials de paper d'oficina tenen un gruix proper als 0,2 mm) a sobre de la plataforma i moure el capçal en la direcció horitzontal Z fins al valor 0. Cal seguir el següent directori *Prepare – Move – Move Z* – assignar el valor 0.

3. Ajustar el valor de desplaçament vertical en Z (*Z-offset*) fins assolir una fricció lleugera entre la punta del fusor i el paper, movent-lo. Cal seguir el següent director *Prepare – Z-offset –* modificar valor a convenir.
4. Desactivar els motors pas a pas que efectuen els moviments axials de la impressora. Cal seguir el següent directori *Prepare – Disable stepper*.
5. Per als quatre cantons de la plataforma d'impressió, desplaçar-hi el capçal i ajustar l'altura d'aquests per mitjà de la rotació de les rodes inferiors fins assolir una sensació homogènia de fricció amb la fulla de paper, movent-la, com l'anterior. Amb una rotació horària de la roda la plataforma s'aproparà cap al fusor, pujarà l'alçada de la placa, doncs.
6. Desplaçar el capçal a una posició centrada, més o menys, i tornar a comprovar la fricció amb la fulla de paper. Si escau, es pot tornar a modificar seguint la instrucció 3.
7. Realitzar el procediment d'autonivellament.

b. Anivellament automàtic (autonivellament)

El model d'impressora *Creality Ender-3 V2 Neo* incorpora el sistema d'autonivellament de la placa base per contacte *CR Touch*. Aquest sistema utilitza una secció específica del software de control per controlar el nivell de la plataforma d'impressió respecte del fusor per mitjà de 16 punts de contacte equidistants entre si i distribuïts formant una quadrícula homogènia. Per mitjà d'un sensor de pressió i un palpador metàl·lic, l'aparell anivella la plataforma amb una exactitud de 0,04 mm (segons el propi fabricant).

Aquest procediment s'activa a través de la pròpia interfície que interactua per mitjà de la pantalla amb l'usuari amb el botó de la pantalla principal *Bed leveling*.

5.4.2.2. [Altres factors a tenir en compte](#)

Prèviament al propi procés d'impressió per FDM i a la posada en marxa de la impressora, cal realitzar un seguit d'accions que asseguraren la correcta i posterior implementació dels paràmetres de fabricació així com la qualitat dels resultats obtinguts.

1. Revisió de l'arxiu STL

Com ja s'ha vist, els models tridimensionals elaborats a partir del programari de modelatge computacional de sòlids, seran convenientment guardats en format *STL* per a ser transmesos a l'*licer*. Abans d'això però, cal revisar-los en la pròpia interfície del software *CAD* per comprovar que no existeixen zones obertes entre cares o superfícies ni errors de construcció. D'aquesta forma s'evitaran despreniments de filament durant la impressió.

2. Comprovació de la quantitat de material disponible

Abans d'iniciar el procés d'impressió cal revisar la quantitat de material disponible en el bobinat carregat en la impressora. L'exhauriment d'aquest durant el procés de modelat provocaria l'obtenció d'una peça inacabada. Alhora, és una problemàtica difícil de solucionar in situ, pel que és millor evitar-la.

El software de tall utilitzat – i gairebé qualsevol altre – facilita una estimació de la massa de material que s'utilitzarà per a imprimir la peça tractada. Aquesta dada es pot utilitzar per a realitzar l'estimació envers el recurs material disponible. Es recomana no inicialitzar la impressió si no es té suficient filament com per a completar-la.

3. Estat de la plataforma

L'estat de la base o plataforma d'impressió és crucial, sobretot per evitar efectes no desitjats com el despreniment de les capes inicials (*warping*). S'ha de comprovar que no presenti esgarrapades, incisions, residus ni presència de restes de material d'impressions prèvies.

En alguns casos serà aconsellable fer ús d'esprais o productes adherents. En la fabricació projectada en aquesta memòria no se n'han utilitzat.

4. Canvi i purgat de filament

Abans de començar la impressió, cal purgar parcialment el filament a través del fusor del capçal. Això serà especialment necessari si la impressió s'efectua immediatament després d'un canvi de filament, i es tracta d'un material diferent o de característiques diferents. Amb aquesta purga s'evita que es combinin materials diferents en una mateixa peça, el que n'alteraria les propietats. Alhora, s'elimina la possibilitat de que el filament comenci a sortir per l'extrusor amb retard i s'hagi de refer el procés per absència de material a les primeres capes. Aquest procés pot ser:

- a. **Manual:** es realitzarà preescalfant el fusor fins a la temperatura d'impressió del filament que cal utilitzar i empenyent-lo amb l'extrusor fins que el flux sigui continu i homogeni.
- b. **Automàtic (paramètric):** s'efectuarà augmentant el nombre de voltes que realitza el capçal copiant la silueta de la peça (*Skirt*) abans de començar la impressió pròpiament. Aquest paràmetre es modifica al programari de tall o *licer* utilitzat. En el present projecte s'ha utilitzat aquesta opció fixant l'ítem en 3 passades.

5.4.3. Correcció dels paràmetres d'impressió (calibratge)

La impressió FDM engloba i implica la problemàtica de la tolerància dimensional de forma implícita. La tolerància de fabricació és d'especial interès en elements destinats a formar part d'un instrument metrològic. A banda de l'anivellament de la plataforma de la impressora, hi ha una sèrie de paràmetres ja presentats (1.5.1. *Impressió tridimensional*) que cal adaptar per assegurar una major exactitud dimensional en la impressió. Per a fer-ho, es seguiran una sèrie de procediments pràctics que permetran establir els valors paramètrics correctius adients.

En aquest cas, l'*licer* o software de tall utilitzat per a la impressió és l'àmpliament utilitzat i conegut *UltiMaker Cura*, en la seva versió gratuïta més actualitzada (*UltiMaker Cura 5.2.2*). Tanmateix, les metodologies aquí exposades es poden replicar en qualsevol programari de tall i preparació d'impressions 3D. Així mateix, cal contemplar les condicions inicials o supòsits sota els que s'ha desenvolupat aquest procés de calibratge:

- a. Per a les comprovacions dimensionals descrites en aquest apartat s'ha fet ús d'un peu de rei electrònic, amb indicació digital, i una precisió de $5 \cdot 10^{-2}$ mm.
- b. Donats els objectius de precisió marcats a l'inici de la memòria, es treballarà en aquest apartat amb 2 xifres decimals significatives, considerant com a poc significatius i eliminant la resta de decimals per arrodoniment. Tanmateix, aquest és el màxim de decimals amb que treballa l'*licer* (*UltiMaker Cura*) utilitzat.
- c. Els diferents processos il·lustrats a continuació es basen en la utilització d'un filament d'àcid polilàctic (PLA). Per al segon material empleat, el TPU, no s'han realitzat els processos de calibratge; la incidència que té en la funcionalitat del disseny aquest material és mínima.

5.4.3.1. Determinació de la temperatura d'impressió òptima

Tot i que els fabricants i proveïdors de filaments per a impressió tridimensional acompanyen el seus productes amb indicacions envers els paràmetres d'impressió (temperatura i velocitat, sobretot) la majoria ho fan per mitjà d'un interval més o menys ampli. En el cas del filament de PLA utilitzat, el fabricant situa la temperatura de treball (temperatura del fusor) entre 210°C i 235°C. Per a determinar de forma més acurada quina és la temperatura d'impressió òptima, es pot seguir el següent procediment:

1. Introduir en l'*licer* o programari de tall el model tridimensional d'un prisma en la que es diferenciïn tants esglaons o parts (de 10 mm d'altura cadascun) com intervals de 5°C hi ha entre els límits de l'interval tèrmic proporcionat pel fabricant. En aquest cas, el prisma disposa de 7 esglaons, i una altura total de 70 mm, doncs.
2. Fixar al *licer* el material a utilitzar, el diàmetre de sortida del fusor, equivalent a l'amplada de línia (*line width*). També cal fixar el recompte de línies de paret (*wall line count*) i el nombre de capes inferiors i superiors (*top/bottom layer*) igual a 3; la densitat de rebliment (*infill density*) s'ha d'establir en un 15%, per donar certa estabilitat a la impressió. La taula següent recull tots els valors utilitzats:

Diàmetre del fusor (<i>line width</i>)	0,44 mm
Material (<i>material</i>)	PLA
Temperatura de la plataforma (<i>bed temperature</i>)	60 °C
Línies de paret (<i>wall line count</i>)	3 línies
Nombre de capes inferiors (<i>bottom solid layers</i>)	3 capes
Nombre de capes superiors (<i>top solid layers</i>)	3 capes
Densitat de rebliment (<i>infill density</i>)	15%

Taula 17. Paràmetres d'impressió inicials I

3. Per a cada conjunt de capes de cada esglaó, fixar a través de l'*licer* una temperatura d'impressió 5°C superior a la de les capes de l'esglaó anterior començant en 210°C, pel primer, i acabant en 235°C pel setè. Cada zona diferenciada tindrà un nombre finit de capes, fixat segons l'altura de capa. (*Print Settings – Material – Options – Temperature and flow graphic* – habilitar i modificar l'opció)
4. Imprimir el prisma.
5. Avaluar en termes d'acabat visual superficial, duresa, deformacions i tolerància dimensional cadascun dels esglaons en relació al model tridimensional original del prisma. La temperatura d'impressió de l'esglaó que presenti uns millors paràmetres de fabricació serà la seleccionada per a produir les peces projectades. En aquest cas, la temperatura d'impressió que resulta òptima i la que s'utilitzarà per a totes les impressions en PLA és de 220°C.

5.4.3.2. Calibratge del flux de filament

El flux de filament es quantifica en l'*licer* a través del paràmetre *Flow* i en percentatge, essent el 100% el flux màxim que pot passar a través de l'extrusor. Per assegurar la qualitat de les impressions s'ha de regular d'acord amb el propi funcionament de la impressora per mitjà del procés iteratiu recollit a continuació:

1. Introduir en l'*slicer* el model tridimensional d'un cub de dimensions conegudes; en aquest cas és un cub de 25 mm de costat.
2. Fixar el material a utilitzar, les temperatures de treball, el diàmetre de sortida del fusor, equivalent a l'amplada de línia (*line width*) i el nombre de capes inferiors (*bottom solid layers*). També cal fixar el recompte de línies de paret (*wall line count*) igual a 1, per assegurar que la paret sigui igual a la línia unitària de material sorgida directament del fusor. Finalment, cal establir la densitat de rebliment (*infill density*) i la capa superior (*top solid layer*) igual a 0, per provocar que s'imprimeixi un cub totalment buit i obert. La taula següent recull tots els valors utilitzats:

Diàmetre del fusor (<i>line width</i>)	0,44 mm
Material (<i>material</i>)	PLA
Temperatura del fusor (<i>print temperature</i>)	220 °C
Temperatura de la plataforma (<i>bed temperature</i>)	60 °C
Línies de paret (<i>wall line count</i>)	1 línies
Nombre de capes inferiors (<i>bottom solid layers</i>)	3 capes
Nombre de capes superiors (<i>top solid layers</i>)	0 capes
Densitat de rebliment (<i>infill density</i>)	0%

Taula 18. Paràmetres d'impressió inicials II

3. Imprimir el cub.
4. Comprovar el gruix de les parets per mitjà d'un peu de rei i comparar-lo amb l'amplada de línia (*line width*). En concret, cal fer el quocient entre l'amplada de línia i el gruix mesurat en la paret del cub. En aquest cas, els resultats obtinguts són els següents:

Cara lateral	Gruix teòric	Gruix real	Quocient
1	0,44 mm	0,45 mm	0,98
2	0,44 mm	0,44 mm	1
3	0,44 mm	0,47 mm	0,94
4	0,44 mm	0,44 mm	1
		Mitjana	0,98
		Flow	0,98

Taula 19. Resultats obtinguts I

5. Introduir el resultat de l'operació anterior, en forma de tant per cent, en el valor del flux (*flow*) (*Print Settings – Material – Flow* – introduir el valor corresponent). En aquest cas, s'ha introduït un percentatge minoritzat del 98% de flux.
6. Si escau, es pot tornar a repetir el procés fins que l'amplada del cub coincideixi amb l'amplada de línia. Quan l'amplada de línia teòrica coincideixi amb la real, s'haurà assolit el valor idoni i calibrat de flux de material fos.

5.4.3.3. Ajust dimensional de les cares exteriors

En moltes ocasions, la cota efectiva entre cares exteriors d'una peça impresa per FDM dista de la cota nominal teòrica. Per corregir aquests errors habituals, o minimitzar-los, cal realitzar el calibratge de les dimensions de les cares exteriors modificant el paràmetre d'impressió *Horizontal Expansion*.

1. Introduir en l'*slicer* o programari de tall el model tridimensional d'una piràmide quadrangular esglaonada formada per l'apilament de prismes de base quadrada de costats coneguts (50, 40, 30, 20 i 10 mm, respectivament), i una alçada d'esglaó homogènia de 5 mm.
2. Fixar el material a utilitzar, les temperatures de treball, el diàmetre de sortida del fusor, equivalent a l'amplada de línia (*line width*). També cal fixar el recompte de línies de paret (*wall line count*) i el nombre de capes inferiors i superiors (*top/bottom layer*) igual a 3; la densitat de rebliment (*infill density*) s'ha d'establir en un 15%, per donar certa estabilitat a la impressió. La taula següent recull tots els valors utilitzats:

Diàmetre del fusor (<i>line width</i>)	0,44 mm
Material (<i>material</i>)	PLA
Temperatura del fusor (<i>print temperature</i>)	220 °C
Temperatura de la plataforma (<i>bed temperature</i>)	60 °C
Línies de paret (<i>wall line count</i>)	3 línies
Nombre de capes inferiors (<i>bottom solid layers</i>)	3 capes
Nombre de capes superiors (<i>top solid layers</i>)	3 capes
Densitat de rebliment (<i>infill density</i>)	15%

Taula 20. Paràmetres d'impressió inicials III

3. Imprimir la piràmide.
4. Un cop impresa, recollir les dimensions dels costats de cada esglaó quadrangular de la piràmide per mitjà d'un peu de rei i comparar-lo amb la cota teòrica, obtenint-ne la diferència. A continuació, es pot fer la mitja aritmètica de les diferències (*offset*) per obtenir-ne un valor únic.

Esglaó	Longitud teòrica	Longitud real a	Longitud real b	Mitjana costats	Diferència
1	50 mm	49,79	49,82	49,81	(-) 0,19
2	40 mm	39,89	39,94	39,92	(-) 0,08
3	30 mm	29,98	29,92	29,95	(-) 0,05
4	20 mm	19,94	20,04	19,99	(-) 0,01
5	10 mm	9,99	10,02	10,01	(+) 0,01
				Mitjana	(-) 0,06
				Horitzontal Expansion	(+) 0,06

Taula 21. Resultats obtinguts II

5. Habilitant l'opció del factor de correcció per a expansions horitzontals (*Print Settings – Walls – Options – Setting Visibility – Horizontal Expansions* – habilitar l'opció) es pot introduir el valor de la mitjana obtinguda amb el signe corresponent en funció de si la impressió esdevé superior (signe negatiu) o inferior (signe positiu) envers les mides teòriques.
6. Si escau, es pot repetir el procés fins que l'amplada dels esglaons impresos coincideixi el més exactament possible amb l'amplada teòrica.

5.4.4.4. Calibratge de diàmetres

La cota real dels diàmetres generats per FDM esdevé un paràmetre crític en termes de variabilitat a causa de la pròpia naturalesa del procés de fabricació. Tenint en compte que en el disseny del BAMC

projectat hi ha diversos diàmetres amb una tolerància assignada per a l'encaix entre peces, resulta essencial que es reguli l'exactitud amb la que la impressora els genera. Per fer-ho cal seguir les instruccions adjuntes enfocades a modificar el paràmetre d'impressió *Hole Horizontal Expansion*:

1. Introduir en l' *slicer* o programari de tall el model tridimensional d'un anell amb els valors dels diàmetres interior i exterior coneguts. En aquest cas, s'ha dissenyat un anell de diàmetre interior 20 mm i exterior 30 mm, amb una alçada de 5 mm.
2. Fixar el material a utilitzar, les temperatures de treball, el diàmetre de sortida del fusor, equivalent a l'amplada de línia (*line width*). També cal fixar el recompte de línies de paret (*wall line count*) i el nombre de capes inferiors i superiors (*top/bottom layer*) igual a 3; la densitat de rebliment (*infill density*) s'ha d'establir en un 15%, per donar certa estabilitat a la impressió. La taula següent recull tots els valors i paràmetres d'impressió modificats:

Diàmetre del fusor (<i>line width</i>)	0,44 mm
Material (<i>material</i>)	PLA
Temperatura del fusor (<i>print temperature</i>)	220 °C
Temperatura de la plataforma (<i>bed temperature</i>)	60 °C
Línies de paret (<i>wall line count</i>)	3 línies
Nombre de capes inferiors (<i>bottom solid layers</i>)	3 capes
Nombre de capes superiors (<i>top solid layers</i>)	3 capes
Densitat de rebliment (<i>infill density</i>)	15%

Taula 22. Paràmetres inicials d'impressió IV

3. Recollir les dimensions dels costats de cada esglaó quadrangular de la piràmide per mitjà d'un peu de rei i comparar-lo amb la cota teòrica, obtenint-ne la diferència. A continuació, es pot fer la mitja aritmètica de les diferències (*offset*) de cada diàmetre per obtenir-ne un valor únic.

Diàmetre	Diàmetre teòric	Diàmetre real	Diferència
Interior	20 mm	19,73 mm	(-) 0,27 mm
Exterior	30 mm	29,83 mm	(-) 0,17 mm
		Mitjana	(-) 0,22 mm
		<i>Hole Horizontal Expansion</i>	(+) 0,22 mm

Taula 23. Resultats obtinguts III

4. Habilitant l'opció del factor de correcció per a expansions diametral (*Print Settings – Walls – Options – Setting Visibility – Hole Horizontal Expansions* – habilitar l'opció) es pot introduir el valor de la mitjana obtinguda amb el signe corresponent en funció de si els diàmetres impresos esdevenen superiors (signe negatiu) o inferiors (signe positiu) envers les cotes teòriques.
5. Per augmentar la precisió obtinguda amb aquesta correcció, es pot tornar a repetir el procés des del principi fins a obtenir l'equivalència (o la mínima diferència) entre cota teòrica i real desitjada.

5.4.5. Paràmetres i temps d'impressió

En aquest apartat, a partir de la definició del material, s'estableixen els paràmetres d'impressió implementats per a la fabricació de les peces que conformen el BAMC. Alhora, també s'exposen els esquemes de segmentació i els temps d'impressió per a cada element projectat.

5.4.5.1. Definició del material

Una vegada ja s'ha vist quin és el procediment de regulació i calibratge previ a la realització de les impressions, es pot passar a definir el material que s'utilitzarà en aquest mètode de fabricació. Tal i com ja s'ha pogut deduir a partir de l'apartat 1.6. *Estudi de materials*, es fa ús d'un filament d'àcid polilàctic (PLA) de la marca comercial *SUNLU*. Les seves característiques principals es recullen en la següent taula:

Model	<i>PLA PLUS</i>
Diàmetre	1,75 mm
Tolerància dimensional	±0,02 mm
Longitud bobinat	330 m (aprox.)
Massa bobinat	1 kg
Color	Gris
Temperatura d'impressió	200 - 230°C
Temperatura de base	Depèn de la plataforma: no o 60 - 80°C
Velocitat d'impressió	50 – 100 mm/s
Ràtio de flux fos	7 – 9 g/10 min (190°C; 2,16 kg)
Compatibilitat	<i>SUNLU, Creality, Anycubic</i> , FDM en general

Taula 24. Propietats del PLA

El segon material utilitzat és el TPU, i les seves característiques es recullen en 1.6. *Estudi de materials*. Tanmateix, només s'ha empleat per a la fabricació de la carcassa del microcontrolador, pel que la incidència de la seva tolerància dimensional en la funcionalitat del BAMC és mínima. Per aquest motiu, no s'ha realitzat el procés d'estudi de materials de forma tant detallada per a la seva selecció; tampoc s'han implementat els calibratges en la impressió FDM.

5.4.5.2. Paràmetres comuns

Un cop especificat el filament que s'utilitzarà per a la conformació de les peces, en les taules adjuntes (Taula 25) es defineixen de forma precisa els paràmetres d'impressió comuns que s'han implementat per a totes les peces del BAMC. Les variables que no han estat modificades resten amb els valors predeterminats de l'*licer UltiMaker Cura*.

Qualitat	
Amplada de línia	0,44 mm
Altura de capa	0,16 mm
Parets	
Guix de parets	1,2 mm
Recompte de línies	2
Expansió horitzontal	+0,06 mm
Expansió horitzontal d'orificis	+0,22 mm
Guix superior/inferior	0,84 mm
Capes superiors	3
Capes inferiors	3

Farciment	
Densitat de farciment	20%
Patró de farciment	Giroide
Material	
Tipus	PLA
Temperatura d'impressió	220°C
Temperatura de base	60°C
Flux	98,0%
Velocitat d'impressió	60 mm/s
Suport	
Generar suport	Sí
Col·locació del suport	Contacte base
Angle de voladís	51°
Suport de base	
Tipologia d'adherència de base	Falda (<i>Skirt</i>)

Taula 25. Paràmetres d'impressió comuns

5.4.5.3. Paràmetres específics

La majoria de paràmetres d'impressió són homogenis per a totes les peces fabricades. Així i tot, en determinats components alguns s'han modificat especialment per assolir característiques i propietats específiques. Alhora, per poder utilitzar un material diferent (TPU), s'han adaptat certs paràmetres.

Peça	Paràmetre d'impressió	Valor
Eix excèntric	Farciment	
	Densitat de farciment	40%
Corona acoblament base	Farciment	
	Densitat de farciment	25%
Carcassa microcontrolador	Material	
	Tipus	TPU
	Temperatura d'impressió	200°C
	Temperatura de base	0°C
	Flux	100,0%
	Velocitat d'impressió	40 mm/s

Taula 26. Paràmetres d'impressió específics

5.5. Operacions d'acabat

Un cop fabricades les diferents peces que conformen el BAMC, en funció del procediment de fabricació emprat, s'han d'aplicar diferents operacions d'acabat. Aquestes serveixen per dotar als components constructius del braç de les seves característiques dimensionals i estètiques finals.

5.5.1. Operacions posteriors al mecanitzat

Els diferents processos de mecanitzat implementats, a causa de l'arrencament d'encenalls, produeixen un acabat bast amb rebava en els orificis i talls realitzats. La rebava es forma de fragments de material que han estat arrencats parcialment, pel que segueixen connectats amb el cos

de la peça en si. En qualsevol cas, el post-processat de les peces mecanitzades variarà en funció del material empleat.

a. Alumini

L'alumini (Al 6061 T4) s'ha empleat per a conformar els passadors del mecanisme cicloidal en que es basen les articulacions del braç de mesura.

1. **Desbarbat:** el desbarbat es realitza per mitjà de diverses limes un cop s'ha definit la forma final de cada passador. Cal posar especial atenció en les rebaves interiors; aquestes poden provocar una excessiva fricció amb els cargols interiors i un mal funcionament del mecanisme cicloidal del que formen part.
2. **Polit:** amb cada passador situat en el capçal del propi torn, aprofitant la rotació d'aquest, s'han polit per mitjà d'un paper de vidre de granulometria petita per eliminar imperfeccions superficials. Això també evita que es generi un desgast excessiu en les cares interiors dels discs cicloïdals de les articulacions del BAMC.

b. Policlorur de vinil (PVC)

El PVC, en format tubular comercial, s'ha introduït en el BAMC com a element estructural i de connexió entre unitats articulades.

1. **Polit:** donat que el PVC és un material polimèric, compta amb una duresa relativament baixa. Així doncs, el desbarbat s'ha realitzat en la mateixa operació de poliment manual fent ús d'un paper de vidre de grànul petit. Aquesta operació s'ha centrat sobretot, en els orificis per on passa el cablejat del braç de mesura.

5.5.2. Operacions posteriors a la impressió 3D

El procés d'impressió per deposició fosa (FDM) a través de dispositius de qualitat baixa-mitjana, genera peces amb un acabat força bast. Alhora, la pròpia impressora no elimina les estructures de suport i tendeix a deixar residus plàstics en els canvis de capa. Per millorar l'aspecte exterior i les prestacions de les peces fabricades per FDM s'han aplicat els següents procediments:

1. **Retallat i eliminació de suports:** els suports generats per sostindre les parts en voladís de les peces durant la impressió, junt amb les restes filamentoses produïdes pels canvis de direcció s'han d'eliminar per mitjà de pinces i eines de tall. També cal eliminar de la plataforma d'impressió el segment d'inici d'impressió i l'estructura de falda (*skirt*) utilitzant una espàtula abans de processar una peça nova.
2. **Polit:** per mitjà de paper de vidre de diferents granulometries (succeïts en ordre descendent en el tamany d'aquestes) s'eliminen els residus superficials restants. Pel mateix procediment, també es poden suavitzar les cares en les que es recolzen les estructures de suport i la diferenciació entre capes dipositades de material fos.
Un cop finalitzat aquest procés, cal netejar amb cura la peça mitjançant aigua freda, assegurant-ne l'assecat total per mitjà d'un drap o paper.
3. **Llac de fosa (*smoothing*):** si l'acabat resultant de la impressió és excessivament bast, per suavitzar les superfícies de les peces es recomana un bany complet en acetona o clorur de

metilè. Aquest procés requereix d'un espai ventilat, extremes precaucions i elements de protecció individual a causa de la naturalesa altament irritant dels dissolvents empleats.

4. **Recobriments superficial (lacat):** un cop s'han eixugat les peces, cal emmascarar-ne amb cinta de paper els orificis i parts interiors. Seguint les indicacions del producte, s'aplicaran entre 2 i 4 capes de vernís transparent en format aerosol, apte per a superfícies plàstiques, amb acabat mat.

5.6. Procediment de muntatge del BAMC

En el present Plec de Condicions també es recullen peculiaritats que cal respectar envers el procediment de muntatge de les diferents peces i components que formen el BAMC projectat.

5.6.1. Muntatge mecànic

Per al muntatge del BAMC s'ha seguit un procés determinat que permet la correcta instal·lació dels diferents element funcionals i electrònics; aquest procediment ordenat també assegura la disposició estructural idònia de les diferents peces i components mecànics. Tanmateix, tot aquest procés es recull en els diagrames adjunts.

Per clarificar la distribució en el muntatge dels elements de subjecció i altres components normalitzats, s'adjunta la següent taula ja exposada en apartats anteriors:

Unió	Tipologia unió	Elements normalitzats	Unitats	Peces unides
Base	Fixa	Cargol DIN 912 M3x12	8	Base – Corona base
		Femella DIN 934 M3	8	
		Volandera DIN 125 B M3	16	
Articulació A	Parell de revolució	Cargol DIN 912 M4x45	4	Corona base – Discs cicloidal inf. i sup. – Corona acoblament base – Tapa simple encóder – Passadors – Eix cicloidal
		Femella hexagonal DIN 934 M4	4	
		Rod. 670-ZZ	2	
		Rod. 688-2RS	2	
		Rod. 6810-2RS	2	
Articulacions B i C	Parell de revolució	Cargol DIN 912 M4x45	4	Corona acoblament base – Discs cicloidal inf. i sup. – Tapa doble encóder – Tapa doble simple - Passadors – Eix cicloidal
		Femella hexagonal DIN 934 M4	4	
		Rod. 670-ZZ	2	
		Rod. 688-2RS	2	
		Rod. 6810-2RS	2	
Articulació D	Parell de revolució	Rod. 6806-2RS	2	Eix SAP – Tapa SAP encóder – Tapa SAP simple
Articulació E	Parell de revolució	Rod. 6002-2RS	1	Eix SAP – Cos SAP
		Segur DIN 471 d13	1	
		Segur DIN 472 D35	1	
Encóders 1, 2, 3 i 4 (A, B, C, D)	Fixa	Cargol DIN 912 M3x12	3	Encóder – Tapa simple encóder

Inici i final tubs PVC	Fixa	Cargol DIN 912 M4x50	2	Tapa doble encóder – Tapa doble simple – Tub PVC
		Femella autoblocant DIN 985 M4	2	
		Volandera DIN 125 A M4	4	

Taula 27. Unitats de muntatge i elements normalitzats que inclouen


Per altra banda, per poder materialitzar el muntatge il·lustrat en les figures anteriors, s'ha fet ús de diverses eines. En la taula annexada (Taula 28) s'especifiquen quines són i en quins elements s'han emprats. L'explicació concreta de com s'han utilitzat, a causa de la seva obvietat, no s'inclou en la present memòria.

Element normalitzat	Eina/utensili
Cargol DIN 912 M3x12	Clau <i>Allen</i> 2,5 mm
Femella DIN 934 M3	Clau de tub (fixa) hexagonal 6 mm
Cargol DIN 912 M4x45/M4x50	Clau <i>Allen</i> 3 mm
Femella hexagonal DIN 934 M4	Clau de tub (fica) hexagonal 8 mm
Femella autoblocant DIN 985 M4	Clau de tub (fixa) hexagonal 8 mm
<i>Seeger</i> DIN 471 d13 (exterior)	Pinces d'anell de retenció exterior
<i>Seeger</i> DIN 472 D35 (interior)	Pinces d'anell de retenció interior
Rodaments diversos	Martell de goma

Taula 28. Eines utilitzades en el muntatge mecànic

5.6.1.1. Fixació de rodaments

En la majoria d'aplicacions de rodaments en el muntatge del BAMC, aquests s'instal·len per pressió envers peces de PLA. Només en l'eix i el cos del SAP s'utilitzen anells *Seeger* o de retenció per assegurar el rodament de l'articulació E. Amb això, els rodaments es situen en punts crítics, entre peces amb un moviment relatiu entre si (parell de revolució), essent la duresa exterior d'aquests elements (acer inox.) molt superior a la de les peces (PLA). Això provoca que hi hagi una tendència al desgast o deformació de les cavitats que acaba causant l'alliberament parcial del rodament (pèrdua de l'ajust per pressió) i un cert joc en l'articulació. Per evitar això, els rodaments instal·lats per pressió van fixats per mitjà d'un component adhesiu normalment utilitzat per a l'assegurament de rosques i cargols. Aquest s'aplica per mitjà d'un pinzell, i en format líquid, en la cavitat abans de la inserció del rodament. Les característiques de l'adhesiu comercial s'exposen en la taula adjunta.


Producte	Proveïdor	Nom comercial	Composició	Característiques
	<i>Loctite</i>	<i>Loctite 243</i>	-	Resistència mitjana Contra vibracions Resistent a l'aigua Resistent a olis i lubricants Compatibilitat total materials

Taula 29. Especificacions d'adhesiu de muntatge comercial

5.6.2. Lubricació d'elements mòbils

Totes les peces i elements normalitzats que disposen de moviments relatius entre ells han estat degudament lubricades per reduir el coeficient dinàmic de freg entre superfícies. Això possibilita una major suavitat en la realització dels moviments i un menor desgast entre peces; aquest fet resulta especialment interessant en els punts de transmissió de forces i en aquelles parts on entren en contacte peces de diferents materials (dureses diferents). L'interior de les articulacions del BAMC que contenen el sistema de multiplicació cicloidal esdevenen una zona de confluència de tots aquests factors derivats del fregament entre peces.

S'ha utilitzat un lubricant en format gel (sòlid), de base silicat (silicona), les característiques del qual es recullen en la següent taula (*Taula 30*). En aquest cas, el format sòlid s'ha anteposat als lubricants líquids típics, en base d'oli, donat que presenta una major impregnació i durabilitat; és a dir, una protecció continuada i més eficient contra els excessos de fricció.

Producte	Proveïdor	Nom comercial	Composició	Característiques
	<i>Prounol</i>	<i>Silicone grase lubricant multi- purpose 100 ml</i>	Silicona 100%	Resistència dielèctrica, resistència als UV i a oxigen Aïllant elèctric i impermeable Tª funcionament -40/+200°C Tª degoteig +250°C NLGI classe 2/3 Incolor

Taula 30. Especificacions del lubricant utilitzat

5.6.2. Muntatge electrònic

Els detalls tècnics de la conformació del circuit electrònic són d'obligat compliment per assegurar el correcte funcionament del BAMC. Cal recordar que, a banda de les articulacions, el braç projectat efectua les mesures gràcies a un seguit d'elements electrònics que treballen de forma conjunta, coordinats per un software que s'executa d'es d'un microcontrolador.

5.6.3. Connexions entre components

Totes les connexions elèctriques del circuit electrònic projectat (*4.7. Esquema de muntatge electrònic*) s'han elaborat per mitjà de soldadura d'estany. Alhora, s'han protegit per mitjà de segments de tub termoretràctil, del diàmetre requerit en cada cas. En les zones d'especial fricció entre el cablejat i elements estructurals perifèrics, també s'han inclòs segments de tub termoretràctil per evitar el desgast excessiu del recobriment dels cables. Igualment, en les zones en que el cablejat queda a la vista, s'han recollit tots els terminals per mitjà també de tubs termoretràctils. Els processos implicats s'exposen de forma detallada en el present apartat.

a. Soldadura en estany


- 1. Preparació dels terminals:** cal assegurar-se de que els terminals a connectar estiguin net i sense residus greixosos o oxidació un cop se n'ha eliminat el segment de recobriment aïllant que els cobreix. S'han de raspallar o netejar les superfícies metàl·liques si és necessari. Un cop connectat el ferro de soldar o soldador, s'ha d'esperar a que aquest s'escalfi. La temperatura adequada dependrà de l'estany que es faci servir i dels materials que s'estan

connectant. Normalment, una temperatura d'uns 260-315 °C (500-600 °F) resulta òptima. En aquest cas s'ha fixat la temperatura en 300°C.

2. **Aplicació de flux:** amb els terminals aproximats o entrelaçats entre sí, cal aplicar una petita quantitat de flux o pasta de soldar al conjunt de superfícies metàl·liques. El flux ajuda a netejar la superfície i millora la capacitat de soldadura, ajudant al repartiment de l'estany fos.
3. **Aplicació de l'estany:** cal contactar lleugerament amb la punta del soldador sobre la superfície metàl·lica durant uns segons per escalfar-la. Després, s'ha de posar en contacte el fil d'estany amb la junta calenta. L'estany es fondrà i es distribuirà al voltant de la connexió. Cal assegurar-se de que l'estany cobreixi tota la junta de manera uniforme.
Tan aviat com l'estany hagi cobert la connexió i s'hagi refredat una mica, es pot retirar lentament el soldador. No s'han de moure els terminals en el procés de refredament per evitar que es solidifiqui en una posició incorrecta.
4. **Revisió:** una vegada que la connexió estigui refredada, s'ha de comprovar que sigui sòlida i que no hi hagi moviment entre els cables. Si la connexió es manté estàtica i estable, la soldadura és bona.
5. **Neteja i acabat (opcional):** si es desitja, es pot netejar l'excés d'estany i flux amb un raspall. Això pot donar-li una aparença més neta a la connexió. En aquest projecte, donat que les connexions aniran cobertes, no s'ha realitzat aquest procediment.

b. Aïllament de les connexions

Sempre resulta convenient per evitar contactes no desitjats o curtcircuits mantenir les connexions aïllades d'elements propers. Per fer-ho es pot afegir una capa d'aïllament, com cinta aïllant o tub de retracció termal, per protegir la unió. En aquest cas s'ha optat per aplicar tubs termoretràctils plàstics, dels diàmetres convenients, utilitzant una pistola de calor no regulable.

Producte	Proveïdor	Nom comercial	Composició	Característiques
	Htbakoi	Gtnz929	Poliolefina	Termoretràctil Ignífug Impermeable T ^a inici contracció +70°C T ^a contracció completa +110°C T ^a funcional -55/+125°C Coef. contracció 2:1 Resis. dielèctrica 15 kV/mm Resis. tensió 10,4 MPa

Taula 31. Especificacions dels recobriments termoretràctils

5.6.3.1. Connexions amb el microcontrolador

Totes les connexions entre els elements electrònics perifèrics i el microcontrolador s'han realitzat utilitzant el mateix sistema. Per motius de pragmatisme i conveniència, s'ha optat per adaptar el sistema de connexió de pins que utilitzen la majoria de plaques i aparells electrònics (*Arduino*, *Elegoo*, etc.). Es tracta d'un terminal metàl·lic rígid amb un diàmetre de 0,55 mm (calibre 26 pel sistema *SWG*). Per implementar-lo, s'han tallat segments amb el terminal de connexió o pin (mascle) a partir de cablejat dirigit a la construcció de circuits en plaques de prova (*breadboard*). Aquests

segments s'han unit per soldadura d'estany amb els terminals dels diferents elements electrònics seguint el procediment anterior.

A banda de l'esquema de representació del circuit electrònic (4.7. *Esquema de muntatge electrònic*), la distribució de connexions a partir del *pinmap* del microcontrolador *M5Core2* s'indica visualment en la figura adjunta (Fig. 56).

	GND	ADC	G35
	GND	ADC	G36
	GND	RST	EN
G23	MOSI	DAC	G25
G38	MISO	DAC	G26
G18	SCK	3.3V	
G3	RXD0	TXD0	G1
G13	RXD2	TXD2	G14
G21	intSDA	intSCL	G22
G32	PA_SDA	PA_SCL	G33
G27	GPIO	GPIO	G19
G2	I2S_DOUT	I2S_LRCK PDM_CLK	G0
	NC	PDM_DAT	G34
	NC	5V	
	NC	BAT	

Fig. 56 Pinmap de l'M5Core2

6. Pressupost

El pressupost dota d'estructura a la dimensió econòmica del projecte, permeten una exposició directa i organitzada de la gestió dels recursos realitzada durant el seu desenvolupament. En aquest pressupost, a banda dels costos materials, s'ha inclòs una aproximació simulada envers els procediments de fabricació, la maquinària utilitzada i els honoraris de treball. Totes les tipologies de recursos econòmics es reparteixen en la seva corresponent partida pressupostaria.

Partida d'enginyeria			
Concepte imputable	Hores	Tarifa (€/h)	Cost total (€)
Elaboració de la memòria	40,00	35,00	1.400,00
Elaboració de la presentació	5,00	35,00	175,00
Investigació	10,00	35,00	350,00
Disseny 3D (SolidWorks)	25,00	50,00	1.250,00
Càlculs del projecte	10,00	35,00	350,00
Elaboració plànol de conjunt	5,00	50,00	250,00
Elaboració plànol d'especejament	5,00	50,00	250,00
Programació	25,00	35,00	875,00
Assaigs i proves	10,00	50,00	250,00
Total	-	-	5.150,00

Partida de costos d'oficina			
Conceptes imputables	Unitats	Cost/unitat (€)	Cost total (€)
Impressió (còpies)	165,00	0,16	26,07
Enquadernació	1,00	15,80	15,80
Fulls desenvolupament projecte	80,00	0,02	1,26
Total	-	-	43,13

Tarifes d'ús de maquinària						
Màquina eina	Pot. nominal (kW)	Preu kWh (€)	Desgast (€/h)	Amortització (€/h)	Operari (€/h)	Tarifa (€/h)
Torn convencional	5,50	0,182	25,95	4,00	10,00	40,953
Amoladora	0,35	0,182	6,25	1,50	10,00	17,814
Serra automàtica	1,50	0,182	3,35	2,00	10,00	15,623
Trepant de peu	0,55	0,182	2,55	1,50	10,00	14,150
Pistola de calor	2,00	0,182	0,03	0,15	10,00	10,545
Soldador	0,05	0,182	0,02	0,10	10,00	10,129
Impressora 3D (MDF)	0,35	0,182	0,65	0,25	0,00	0,964

Tarifes treballadors	
Tipus de professional	Tarifa (€/h)
Instal·lador	10,00
Operari mecanitzat	10,00

Quadre de repartiment primari de costos	
Costos indirectes	Criteri de repartiment
Llum	Preu mitjà - potència instal·lada
Energia consum maquinària	Potència nominal - potència instal·lada
Manteniment productiu	Valor d'equips i recanvis i usos prevists
Amortitzacions	Valor d'equips i recanvis i usos prevists
Costos directes	
Detallats en les partides	

Tarifes d'enginyeria (honoraris)	
Tipus de professional	Tarifa (€/h)
Enginyer tècnic	35,00

Partida de fabricació							
Costos d'impressió 3D (+ material)							
Peça	Unitats	Material	Massa (g)	Preu (€/g)	Cost material (€)	Operació	Tarifa (€/h)
Base	1,00	PLA	203,20	0,0139	2,82	MDF	0,9638
Corona base	1,00	PLA	54,80	0,0139	0,76	MDF	0,9638
Tapa simple encóder	1,00	PLA	33,20	0,0139	0,46	MDF	0,9638
Corona acoblament base	1,00	PLA	113,80	0,0139	1,58	MDF	0,9638
Tapa doble encóder	2,00	PLA	53,10	0,0139	1,48	MDF	0,9638
Tapa doble simple	2,00	PLA	57,20	0,0139	1,59	MDF	0,9638
Corona acoblament tubular	1,00	PLA	94,80	0,0139	1,32	MDF	0,9638
Disc cicloidal superior	3,00	PLA	23,90	0,0139	1,00	MDF	0,9638
Disc cicloidal inferior	3,00	PLA	23,90	0,0139	1,00	MDF	0,9638
Eix excèntric	3,00	PLA	3,10	0,0139	0,13	MDF	0,9638
Tapa SAP encóder	1,00	PLA	47,30	0,0139	0,66	MDF	0,9638
Tapa SAP simple	1,00	PLA	43,40	0,0139	0,60	MDF	0,9638
Eix SAP	1,00	PLA	88,30	0,0139	1,23	MDF	0,9638
Cos SAP	1,00	PLA	156,20	0,0139	2,17	MDF	0,9638
Carcassa microcontrolador	1,00	TPU	30,60	0,0180	0,55	MDF	0,9638
Totals	-	-	-	-	17,33	-	-

Partida de fabricació				
Costos d'impressió 3D (+ material)				
Peça	Unitats	Temps (h)	Cost d'ús (€)	Cost total (€)
Base	1,00	19,20	18,51	21,33
Corona base	1,00	5,03	4,85	5,61
Tapa simple encóder	1,00	1,90	1,83	2,29
Corona acoblament base	1,00	10,45	10,07	11,65
Tapa doble encóder	2,00	4,72	9,09	10,57
Tapa doble simple	2,00	4,40	8,48	10,07
Corona acoblament tubular	1,00	7,73	7,45	8,77
Disc cicloidal superior	3,00	1,48	4,29	5,28
Disc cicloidal inferior	3,00	1,48	4,29	5,28
Eix excèntric	3,00	0,40	1,16	1,29
Tapa SAP encóder	1,00	3,72	3,58	4,24
Tapa SAP simple	1,00	3,67	3,53	4,14
Eix SAP	1,00	4,77	4,59	5,82
Cos SAP	1,00	5,75	5,54	7,71
Carcassa microcontrolador	1,00	3,10	2,99	3,54
Totals	-	-	90,26	107,59

Costos de mecanitzat (+ material)							
Peça	Unitats	Material	Longitud (m)	Preu (€/m)	Cost material (€)	Operació	Tarifa (€/h)
Passador	12,00	Al 6061 T4 ø8 mm	0,03	2,09	0,70	Tornejat	40,953
						Amolat	17,814
Tub curt	1,00	PVC ø32 mm	0,43	3,12	1,33	Serrat	15,623
						Trepanat	14,150
Tub llarg	1,00	PVC ø33 mm	0,52	3,12	1,62	Serrat	15,623
						Trepanat	14,150
Totals	-	-	-	-	3,65	-	-

Costos de mecanitzat (+ material)			
Peça	Unitats	Cost d'ús (€)	Cost total (€)
Passador	12,00	24,57	35,96
		10,69	
Tub curt	1,00	2,08	5,76
		2,35	
Tub llarg	1,00	2,03	6,06
		2,41	
Totals	-	44,12	47,77
		Total fabricació	155,36

Partida de materials i elements comercials				
Elements normalitzats				
Element	Proveïdor	Unitats	Preu/unitat (€)	Cost total (€)
Cargol DIN 912 M3x12 8.8	Tornilleria Malagueña S.C.A	20,00	0,04	0,79
Cargol DIN 912 M4x50 8.8	Tornilleria Malagueña S.C.A	8,00	0,06	0,44
Cargol DIN 912 M4x45 8.8	Tornilleria Malagueña S.C.A	12,00	0,10	1,14
Femella hexagonal DIN 934 M3 8.8	Tornilleria Malagueña S.C.A	8,00	0,01	0,06
Femella hexagonal DIN 934 M4 8.8	Tornilleria Malagueña S.C.A	12,00	0,02	0,19
Femella autoblocant DIN 985 M4 8.8	Tornilleria Malagueña S.C.A	8,00	0,03	0,25
Volandera DIN 125 B M3 A2	Tornilleria Malagueña S.C.A	16,00	0,01	0,16
Volandera DIN 125 A M4 A2	Tornilleria Malagueña S.C.A	16,00	0,02	0,25
Anella seguretat Seger ext. DIN 471	Tornilleria Malagueña S.C.A	1,00	0,08	0,08
Anella seguretat Seger int. DIN 472	Tornilleria Malagueña S.C.A	1,00	0,11	0,11
Rodament 6700-ZZ	XiKe	6,00	1,12	6,72
Rodament 688-2RS	XiKe	6,00	0,94	5,64
Rodament 6806-2RS	XiKe	2,00	1,90	3,80
Rodament 6002-2RS	XiKe	1,00	4,68	4,68
Rodament 6810-2RS	XiKe	6,00	6,08	36,50
Total	-	-	-	60,82

Components electrònics				
Element	Proveïdor	Unitats	Preu/unitat (€)	Cost total (€)
Encòder òptic incremental	GTEACH	4,00	14,31	57,24
Microcontrolador M5Core2	M5Stack	1,00	46,89	46,89
Polsador G160	GUZZI	1,00	1,10	1,10
Resistència ES-EL-CK-004 1 kΩ	ELEGOO	1,00	0,02	0,02
Condensador B07DJ517WL 1μF	DollaTek	1,00	0,06	0,06
Cablejat 26AWG	HUAZIZ	4,20	0,17	0,73
Pins connexió 26AWG	ELEGOO	11,00	0,02	0,22
Protectors termoretràctils GTNZ929	Htbakoi	35,00	0,01	0,28
Total	-	-	-	106,52

Materials en brut (inclòs en els costos de fabricació)				
Element	Proveïdor	Unitats (kg/m)	Preu/unitat (€)	Cost total (€)
Tub PVC ø32 mm	Leroy Merlin (JSL)	0,95	3,12	2,95
Alumini tubular 6061 T4 ø8 mm	Leroy Merlin	0,34	2,09	0,70
PLA (bobinat fil)	SUNLU	2,00	13,90	27,79
TPU (bobinat fil)	SUNLU	0,31	18,00	5,51
Total	-	-	-	36,95

Altres				
Element	Proveïdor	Unitats	Preu/unitat (€)	Cost total (€)
Lubricant Prounol	Prounol	0,25	10,90	2,73
Vernís transparent mat	LUXENS	1,00	6,29	6,29
Palpador metàl·lic SAP	CCLKHY	1,00	0,38	0,38
Adhesiu Loctite 243	Loctite	1,00	7,82	7,82
Bobina estany soldadura	Meccion	1,00	7,10	7,10
Total	-	-	-	24,32
			Total materials	191,67

Partida de muntatge i ajust			
Concepte imputable	Hores	Tarifa (€/h)	Cost total (€)
Muntatge	5,00	10,00	50,00
Calibratge	3,00	10,00	30,00
Reajust	2,00	10,00	20,00
Total	-	-	100,00

Resum pressupost	
Partida pressupostada	Import total (€)
Enginyeria	5.150,00
Costos d'oficina	43,13
Fabricació	155,36
Materials i elements comercials	191,67
Muntatge i ajust	100,00
Subtotal	5.640,16
Imprevistos (10%)	564,02
Benefici (20%)	1.128,03
Total (IVA no incl.)	7.332,21
IVA (21%)	1.539,76
Total projecte	8.871,98

Amb tot això, cal denotar que els costos d'enginyeria junt amb altres despeses derivades de serveis (costos d'oficina, tarifes i honoraris, muntatge i ajust, etc.) són orientatives i simulades. Només tenen la funció de dotar de cert realisme industrial i econòmic al projecte. Tanmateix, la part que sí s'ajusta totalment a la realitat són les partides de fabricació i la costos materials i dels components comercials utilitzats. Aquesta segments del pressupost estan calculats de forma molt detallada per aproximar al màxim el cost projectat al real.

7. Càlculs justificatius

En aquest apartat de la present memòria s'inicia el desenvolupament de l'etapa del mètode *PREDICA* coneguda com Enginyeria d'Execució. Aquesta fase és l'encarregada de la materialització del projecte, des del disseny conceptual i de detall a la pròpia producció d'allò projectat. Per a fer-ho, es parteix d'un procés de càlcul i parametrització d'aquells elements i particularitats de disseny que cal justificar analíticament i teòricament. Així s'evita experimentar situacions inesperades i conflictives (ruptures, averies, desgast excessiu, etc.) durant el funcionament del braç de mesura.

7.1. Disseny del mecanisme cicloidal

Per al disseny d'un mecanisme cicloidal específic, cal realitzar un procés de càlcul previ. A través d'aquest procediment es defineixen els paràmetres dimensionals i la relació de transmissió que caracteritzen el mecanisme i que, a través de la documentació tècnica adient, en permeten la seva fabricació.

Cal tenir present la importància que recau en el mecanisme cicloidal projectat; aquest és la unitat mecànica funcional en la que es basen les articulacions del BAMC i, per tant, el seu funcionament, amb tot el que això implica.

7.1.1. Paràmetres característics d'un mecanisme cicloidal

Un engranatge cicloidal es basa en un cert nombre de pins (n_p) disposats de forma equidistants en una corona descrivint una circumferència de radi determinat (R_p) a dintre de la qual hi rota el disc cicloidal o rotor. En aquest cas, la forma del disc serà de tipus epicicloidal, és a dir, que es generarà a partir d'una circumferència de radi petit (R_r) rotant al voltant d'una circumferència base (R_b) un cert nombre de cops (n_d), generant-se una dent o lòbul al disc per a cadascuna de les rotacions efectuades. La trajectòria descrita per un punt qualsevol de la circumferència rotant petita descriurà el perfil de cada dent del disc. Així mateix, el rotor o disc cicloidal comptarà amb un nombre de dents o lòbuls (n_d) igual al nombre de pins de la corona (n_p) menys la unitat. Alhora, disposarà d'un cert nombre arbitrari d'orificis interiors disposats seguint una disposició concèntrica i simètrica i de radi conegut (r_f). A través d'aquests orificis s'hi situaran els passadors, al voltant dels quals, i de forma tangencial, rotarà el rotor. A major nombre de passadors, i de forats en el disc cicloidal doncs, major podrà ser el parell transmès a través del mecanisme. Els passadors aniran directament connectats a l'eix de sortida del moviment. Per altra banda, cal garantir una transferència de moviment bidireccional, és a dir, la utilització del mecanisme cicloidal indistintament com a reductor i com a multiplicador. Aquesta característica, designada sota el terme anglosaxó *backdrivable*, és indispensable en la construcció del braç articulat de mesura projectat. Per a possibilitar-la, caldrà assegurar la mínima fricció possible entre els passadors i els disc cicloidal del mecanisme i la inexistència de punts morts de moviment.

El procediment de disseny descrit en aquest apartat es refereix a un mecanisme cicloidal utilitzat com a reductor; a efectes pràctics, aquell usat com a multiplicador es construirà de la mateixa forma. El disseny d'un mecanisme cicloidal parteix del coneixement de la relació de transmissió desitjada, del quocient entre la velocitat angular de sortida i la d'entrada. Alhora, degut al propi funcionament dels mateixos, es podrà expressar en termes del nombre de pins o dents de la corona (n_p) i de lòbuls del disc cicloidal (n_d):

$$i = \frac{n_p - n_d}{n_d} \quad [1]$$

i : relació de transmissió

n_p : nombre de pins de la corona

n_d : nombre de lòbuls del disc cicloidal

Unes línies amunt s'ha mencionat que hi haurà sempre un lòbul cicloidal (n_d) més al disc que pins (n_p) hi hagi a la carcassa de la corona dentada. Això fa que, per a una rotació completa del rodament o eix excèntric, el disc cicloidal avanci només la distància d'un lòbul o dent. D'aquí es pot deduir que la relació de transmissió (i) depèn únicament del nombre de passadors o pins de la corona dentada. Així doncs, el ràtio de reducció assolible amb el mecanisme cicloidal dissenyat sempre equivaldrà a la inversa del nombre de pins de la corona (n_p) menys la unitat:

$$n_p = n_d + 1 \quad [2]$$

$$i = \frac{1}{n_p - 1} \quad [3]$$

Un cop es coneix la relació de transmissió buscada, per dissenyat aquest tipus de mecanisme es necessiten 3 paràmetres principals que s'elegiran de forma més o menys arbitrària, adaptant-los a les necessitats del disseny projectat:

- i. **Radi dels pins (r_p):** a major mida dels pins, major parell seran capaços de transmetre, però provocaran que les dimensions del muntatge augmentin considerablement.
- ii. **Nombre de pins (n_p):** determina el ràtio de reducció o relació de transmissió (i).
- iii. **Radi de la corona (R_p):** el cercle que conté els pins (passant pel seu centre) ha de ser suficientment gran com per poder disposar d'espai entre els pins per possibilitar la rotació del disc cicloidal. El seu valor es fixarà en funció de les dimensions generals del disseny i/o de l'espai disponible.

Els valor anteriors es poden relacionar a partir de la longitud de circumferència interior de la corona amb la següent expressió:

$$r_p = \frac{2\pi \cdot R_p}{4 \cdot n_p} = \frac{\pi \cdot R_p}{2 \cdot n_p} \quad [4]$$

r_p : radi dels pins

R_p : radi de la corona

n_p : nombre de pins

A partir dels valors inicials arbitraris, es poden determinar la resta de paràmetres geomètrics necessaris per construir el disc epicicloidal:

- iv. **Radi de la circumferència rotant (R_r):** la circumferència que rota al voltant del disc ha de tenir una circumferència de longitud igual al pas o distància de separació entre pins. Aplicant les simplificacions geomètriques pertinents, el radi del cercle rotant (R_r) equivaldrà al radi del cercle o corona que conté els pins (R_p) entre el nombre de pins (n_p).

$$R_r = \frac{R_p}{n_p} \quad [5]$$

- v. **Radi circumferència base (R_b):** el radi de la circumferència rotada haurà de ser exactament igual al radi de la circumferència rotatòria multiplicada pel nombre de pins menys la unitat, per la relació de transmissió, doncs.

$$R_b = R_r \cdot (n_p - 1) = R_r \cdot i \quad [6]$$

- vi. **Excentricitat (e):** l'excentricitat o *offset* és la distància perpendicular entre l'eix de rotació d'entrada i el centre de rotació del disc cicloidal. El seu valor hauria de ser inferior al radi dels pins de la corona dentada (r_p); de fet, la meitat d'aquest paràmetre geomètric funcionarà satisfactòriament com a mida d'excentricitat.

$$e \leq r_p \rightarrow e \approx \frac{1}{2} r_p \quad [7.1, 7.2]$$

e : excentricitat

r_p : radi dels pins

- vii. **Radi dels orificis passants (r_f):** el radi dels forats interiors al disc cicloidal es pot determinar a partir del radi dels pins (r_p) i la pròpia excentricitat abans citada.

$$r_f = r_p + 2e \quad [8]$$

r_f : radi orifici passant

r_p : radi dels pins

e : excentricitat

Amb tot això, la següent taula recull els paràmetres inicials seleccionats i el procés de disseny del disc cicloidal projectat per a les articulacions del BAMC. Per això últim, la taula també inclou els resultats de les expressions exposades anteriorment.

Procediment de disseny del mecanisme cicloidal		
	Paràmetre	Valor
Paràmetres inicials	Relació de transmissió (i) [1]	24 (multiplicador)
	Radi pins (r_p) [4]	2 mm
	Nombre pins (n_p) [4]	25 pins
	Radi corona (R_p) [4]	32,5 mm
Paràmetres deduïts	Paràmetre	Valor
	Nombre dents (n_d) [2]	24 dents
	Radi circum. rot. (R_r) [5]	1,3 mm
	Radi circum. base (R_b) [6]	31,2 mm
	Excentricitat (e) [7.1]	1 mm
	Radi orifi. passant (r_f) [8]	4 mm

Taula 32. Paràmetres de disseny del mecanisme cicloidal projectat

7.1.1.1. Parametrització del disc cicloidal

El disc cicloidal o rotor esdevé la peça fonamental sobre la que es construeix tot el funcionament d'un mecanisme cicloidal. Així doncs, la caracterització de forma paramètrica de la corba que en delimita el perfil serà el que possibilitarà el seu modelatge per mitjà del software CAD utilitzat (*SolidWorks*).

Anteriorment s'han enumerat els paràmetres característics que en defineixen la forma lobular. Alhora, s'ha parlat del concepte geomètric de la cicloide, i les seves variants (epicicloide i hipocicloide) essent aquestes figures fonamentals en la construcció d'un engranatge cicloidal. Ara bé, a la pràctica es voldrà que el flanc perimetral del disc cicloidal no coincideixi exactament amb el centre geomètric dels pins de la corona dentada; això causaria una interferència física tot impedit el muntatge del mecanisme. En realitat la forma del disc cicloidal buscada ha d'estar desplaçada una certa distància. Així doncs, el punt de la circumferència rotant (R_r) en la construcció de l'epicicloide que s'agafa per a construir la seva trajectòria (perfil dentat) no ha de ser un punt perimetral, situat a una distància del centre igual al radi, sinó un punt intermedi. D'aquesta imposició apareix una altra variant de la corba cicloide, anomenada *epitroide* o *epitrocoide*. Es tracta, utilitzant la mateixa simbologia que en les equacions anteriors, d'una corba traçada per un punt unit a un cercle exterior mòbil (R_r) que gira entorn de l'exterior d'una circumferència base fixa (R_b), trobant-se el punt a una certa distància (d) del centre del cercle exterior rotant. Les equacions paramètriques bidimensionals que descriuen la forma geomètrica de l'epitrocoide són, en funció dels paràmetres exposats en l'apartat anterior, les següents:

$$x(\theta) = R_b \cos \theta - r_p \cos(\theta - \psi) - e \cdot \cos(n_p \theta) \quad [9.1]$$

$$y(\theta) = -R_b \sin \theta - r_p \sin(\theta - \psi) + e \cdot \sin(n_p \theta) \quad [9.2]$$

$$\psi = -\tan^{-1} \left[\frac{\sin(1 - n_p) \theta}{\frac{R_b}{e \cdot n_p} - \cos((1 - n_p) \theta)} \right] \text{ per } (0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ) \quad [9.3]$$

R_b : radi de la circumferència base del disc

r_p : radi dels pins de la corona

e : excentricitat

n_p : nombre de pins de la corona

θ : angle rotat o de pas; paràmetre angular

ψ : angle de contacte entre un lòbul del disc cicloidal i un pin de la corona

La precisió del perfil del rotor dependrà del valor de l'angle de pas (θ); com més petit és aquest, la forma corresponent a l'epitrocoide és més precisa. La precisió constructiva resulta en un millor engranatge entre les dents del disc i els rodets o pins, donant lloc a un joc (*backlash*) inferior. En qualsevol cas, les equacions paramètriques obtingudes es recullen en la taula adjunta (*Taula 33*). Aquestes equacions són les introduïdes en el software CAD per construir la corba del perímetre del disc cicloidal.

Equacions paramètriques del disc cicloidal	
$x(\theta) = 31,2 \cos \theta - 2 \cos(\theta - \psi) - \cos(25\theta)$	[9.1]
$y(\theta) = -31,2 \sin \theta - 2 \sin(\theta - \psi) + \sin(25\theta)$	[9.2]
$\psi = -\tan^{-1} \left[\frac{\sin(1 - 25) \theta}{\frac{31,2}{25} - \cos(-24\theta)} \right]$	per $(0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ)$ [9.3]

Taula 33. Corbes parametritzades de l'epitrocoide

7.2. Dimensionament d'elements mecànics

En aquest apartat es presenten els procediments de càlcul aplicats per al correcte dimensionament de certs components mecànics i estructurals considerats com a crítics en el conjunt total del braç. Aquests processos permeten l'acotació de les dimensions i les característiques finals d'aquests elements del BAMC per assegurar el correcte funcionament del mateix.

Cal esmentar que tots els processos de dimensionament desenvolupats en els següents apartats són comprovacions estàtiques, és a dir, que només contempen accions aplicades de forma puntual, sense tenir en compte el factor temporal, la freqüència de l'aplicació o la seva variabilitat. La raó principal per la que els elements funcionals no s'han dimensionat a fatiga recau en la tipologia dels moviments donats en el BAMC. Cap dels components mecànics del braç de mesura experimenta un moviment continuat durant llargs períodes de temps ni accions aplicades de manera intermitent o variable. De fet, en la majoria de casos els moviments relatius de revolució entre elements giratoris són inferiors als 10 min^{-1} (10 rpm). Per tant, a efectes pràctics, es poden considerar les sol·licitacions com estàtiques [12].

7.2.1. Incís envers la fabricació per FDM

A banda dels procediments de mecanitzat i altres activitats de menor importància, el procés de fabricació més empleat en el desenvolupament material del prototip de BAMC projectat és el modelatge per deposició fosa (FDM). A l'hora de fonamentar els processos de càlcul i dimensionament dels components fabricats per mitjà d'aquesta tecnologia, cal tenir en compte una sèrie de peculiaritats de vital importància.

Per la pròpia naturalesa additiva d'aquest sistema de fabricació (1.5.1. *Impressió tridimensional*), les peces obtingudes presenten una estructura estratificada, per capes. Aquestes capes, tot i estar unides per la pròpia fusió del material polimèric, representen una secció més feble als esforços i a les sol·licitacions a la que es sotmet la peça. Sobretot si es té en compte que, en l'àmbit domèstic de fabricació, el control de l'ambient en el que es realitza la impressió i els seus components (humitat, temperatura, corrents d'aire, partícules en suspensió, etc.) resulta molt complex.

Així doncs, en les peces fabricades per FDM, l'anisotropia esdevé, inevitablement, una característica intrínseca ja no en el material (nivell atòmic o molecular), sinó a nivell d'estructura supramolecular. És a dir, l'orientació en la que es fabrica un element, i per conseqüent la de l'estratificació o deposició de les capes de material fos, determinen la capacitat de resistència mecànica d'aquest. També condicionen, doncs, la direccionalitat i la tipologia dels esforços que la peça és capaç de resistir.

Tot plegat, aquesta situació provoca un augment de la dificultat i la complexitat en el procés de dimensionament i en el càlcul de tensions i deformacions en el muntatge mecànic del BAMC. Alhora, s'impossibilita l'aplicació de tècniques computacionals d'anàlisi tensional com el mètode dels elements finits (MEF), donat que aquests es basen en la homogeneïtat material.

Per altra banda, la bibliografia envers l'estudi del comportament mecànic de peces produïdes per FDM és reduïda i sovint s'enfoca a situacions molt específiques.

Amb tot això, en aquest projecte s'ha optat per combinar el dimensionament habitual per mitjà de càlculs i teories tensionals i d'esforços amb l'experimentació. D'aquesta forma, certes cotes d'esforç i paràmetres màxims utilitzats per al dimensionament dels elements mecànics han estat determinats a partir d'assaigs experimentals (8. *Fase experimental*) que contempla els paràmetres de fabricació projectats.

7.2.2. Presentació de la situació d'ús

Per a la realització del dimensionament d'un element mecànic qualsevol, s'acostuma a partir d'uns valors inicials de sol·licitacions (forces i/o moments) que incideixen sobre l'element en una situació d'ús determinada. En el cas dels components mecànics del BAMC projectat però, aquests treballen gairebé de forma simultània i en conjunt durant el procés de mesura. Alhora, ho fan amb una orientació i una disposició gairebé aleatòria i seguint un esquema cinemàtic amb múltiples punts d'enclavament possibles i trajectòries imprevisibles. Per altra banda, també cal considerar el factor humà; l'efector o iniciador del moviment serà sempre l'usuari, la capacitat d'exercir força del qual resulta difícil de quantificar i estandarditzar. Per disminuir aquest complex entramat de factors de difícil mesura, tots els càlculs de dimensionament partiran d'una hipotètica situació inicial d'ús del BAMC; a partir d'aquesta, s'obtidran els valors de sol·licitacions amb els que treballar.

La quantificació de les components mostrades parteix d'aquests supòsits:

- El BAMC es troba totalment estirat, amb els diferents segments que el formen alineat. Aquesta és la posició en la que la majoria d'esforços es maximitzen. També l'acció de l'usuari és màxima.
- Només es tenen en consideració els components a partir de l'articulació B; la resta (base i art. A) actuen com a bancada.
- Es suposa l'aplicació d'una força (F_E) en el SAP, perpendicular al braç, que en permet sostenir-ne la posició de forma estàtica.
- El valor del moment resistent (M_R) ofert per les articulacions del braç, a través del seu mecanisme cicloidal, s'ha determinat mitjançant l'experimentació (8.4. *Determinació del parell resistent articular*).

7.2.3. Diagrama i càlcul d'accions

Un cop presentada la situació d'ús, es poden determinar les sol·licitacions en l'articulació B, la determinada crítica a causa de la seva posició. Tanmateix, s'ha considerat la totalitat del BAMC com un sol segment, sota el supòsit de maximitzar els esforços patits en la unitat articular.

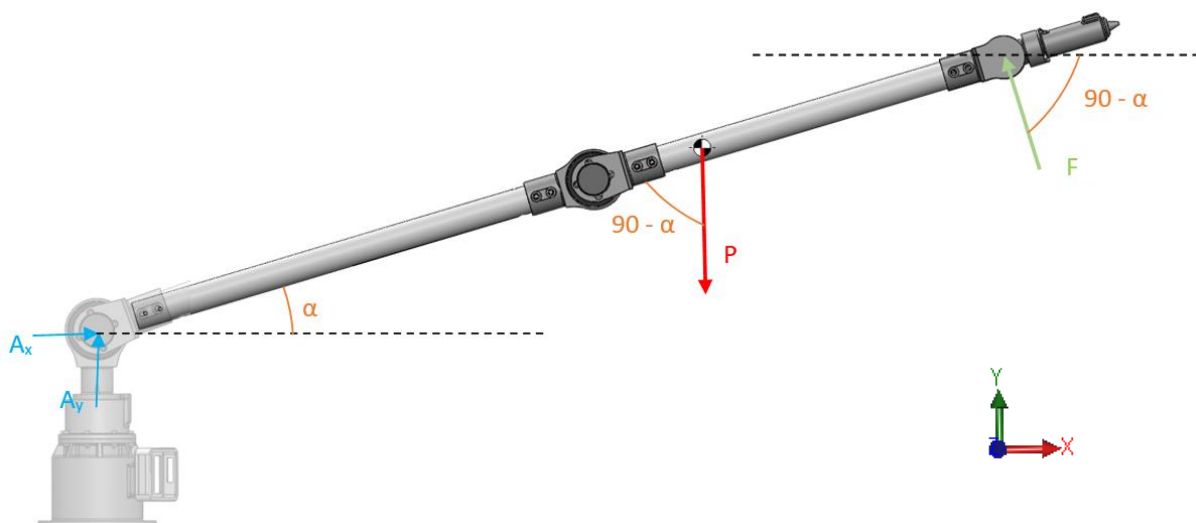


Fig. 57 Diagrama de forces simplificat sobre el BAMC

Per determinar les components de reacció en l'articulació B, s'han aplicat les condicions d'equilibri bàsiques en funció de l'angle rotat α :

$$\sum F = 0 [1] \rightarrow \sum F_x = 0 [1.1]; \sum F_y = 0 [1.2]$$

$$B_x - F_E \cdot \cos(90 - \alpha) = 0$$

$$P - B_y - F \cdot \sin(90 - \alpha) = 0$$

$$\sum M_B = 0 [2]$$

$$M_R + \text{dist.}(B, CM) \cdot \cos(\alpha) \cdot P - F \cdot \text{dist.}(B, D) = 0$$

Es parteix d'un recull de dades del conjunt,

Dades inicials	
P	14,35 N
M_R	0,32 Nm
$\text{dist.}(B, CM)$	691,26 mm
$\text{dist.}(B, D)$	1100 mm

Taula 34. Dades inicials I

Els resultats obtinguts es recullen en la següent taula:

Resultats anàlisi estàtic			
α (°)	F (N) [2]	B_x (N) [1.1]	B_y (N) [1.2]
0	9,31	0,00	5,04
15	9,00	2,33	5,66
30	8,10	4,05	7,33
45	6,67	4,71	9,64
60	4,80	4,16	11,95
75	2,62	2,54	13,67
90	0,29	0,29	14,35

Taula 35. Resultats anàlisi estàtic

A partir dels valors màxims d'entre els calculats es desenvolupa la resta del procés de dimensionament dels elements mecànics que s'ha considerat oportú.

7.2.4. Dimensionament de l'articulació

En la unitat articular repetitiva del BAMC s'han determinat dos elements com a especialment crítics en base als procediments experimentals realitzats (8.3. Assaig de fallada estàtica en l'articulació). La bibliografia consultada també contrasta i recolza aquesta decisió [14]. Així doncs, els elements més

sol·licitats són els passadors d'alumini i l'eix central del mecanisme. Per la seva implicació en el conjunt de l'articulació, s'ha optat per a dimensionar-los mitjançant un procés de càlcul individualitzat.

Per altra banda, també es dimensionaran els rodaments o coixinets de rodolament donat que esdevenen un element àmpliament utilitzat en la construcció del braç. De fet, es troben presents en cadascuna de les articulacions A, B, i C en forma de tres parells idèntics (6 rodaments per articulació).

El dimensionament dels elements articulars parteix del moment que la màxima força (F) calculada exerceix sobre l'articulació B (M_E). Alhora, aquesta acció, en l'interior de la unitat articular, es divideix igualitàriament entre les forces efectuades pels dos discs cicloïdals contra la corona (F_C). La transmissió cap als discs s'efectua a través dels 4 passadors d'alumini situats de forma equidistants al centre de cada disc (F_P). L'acció resultant que genera el moviment en l'eix excèntric equilibra el conjunt (F_E). Tanmateix, aquesta representació (Fig. 58) és una simplificació de l'estudi de forces que actuen sobre un mecanisme cicloïdal durant el seu funcionament [15].

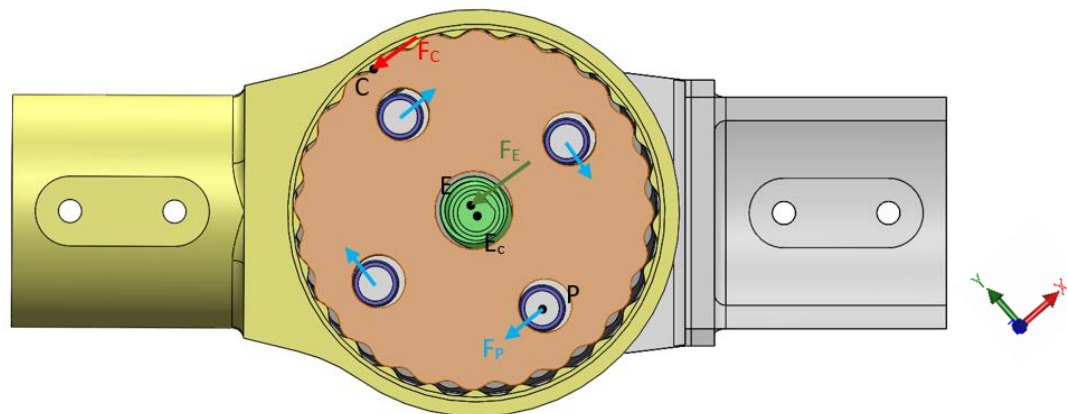


Fig. 58 Accions en el si de l'articulació cicloïdal

$$4F_P \cdot \text{dist.}(E_C, P) = \frac{1}{2} F \cdot \text{dist.}(E_C, D) \quad [1]$$

$$\text{dist.}(E_C, D) = \text{dist.}(B, D) \quad [1.1]$$

També cal tenir en compte la relació de transmissió del mecanisme cicloïdal (i) i la Llei de Conservació del Moment Angular que l'acompanya,

$$i = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{n_d}{n_p - n_d} \quad [2]$$

$$T_e \cdot \omega_e = T_s \cdot \omega_s \rightarrow i = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{T_e}{T_s} = \frac{n_d}{n_p - n_d} \quad [2.1]$$

i : relació de transmissió

ω_s, ω_e : velocitats angulars d'entrada i sortida

n_d : nombre de dents dels discs cicloïdals

n_p : nombre de pins de la corona

T_s, T_e : parells d'entrada i sortida

Aquests termes es poden relacionar amb els paràmetres constructius del mecanisme cicloïdal vistos anteriorment (7.1. Disseny del mecanisme cicloïdal),

$$T_e = F \cdot \text{dist.}(E_C, D) \quad [3]$$

$$T_s = 2F_E \cdot e \quad [4]$$

$$e = \text{dist.}(E_C, E) \quad [4.1]$$

$$\text{dist.}(C, E_C) = R_p \quad [4.2]$$

R_p : radi de la corona cicloidal

e : excentricitat

Es parteix de les dades conegudes del conjunt,

Dades inicials	
i	24
F	9,31 N
e	1 mm
$\text{dist.}(E_C, C)$	32,5 mm
$\text{dist.}(E_C, P)$	20,5 mm
$\text{dist.}(B, D)$	1100 mm

Taula 36. Dades inicials II

Seguint el procediment de càlcul, s'obtenen els següents valors:

Forces resultants	
F_p [1]	62,45 N
F_E [2.1,4]	213,35 N

Taula 37. Forces resultants

Les components obtingudes serveixen com a punt de partida pels procediments de dimensionament de cadascun dels elements exposats en els següents apartats.

7.2.4.1. Passadors d'alumini

Cadascun dels 4 passadors d'alumini que incorpora cada unitat articular cicloidal experimenta l'acció doble de la força F_p calculada, aplicada per part dels dos discs cicloidal alhora (F_{p1}, F_{p2}). Aquestes components generen les respectives reaccions (R_A, R_B) en els extrems dels passadors, inserits en les bases dobles de l'encòder i simple.

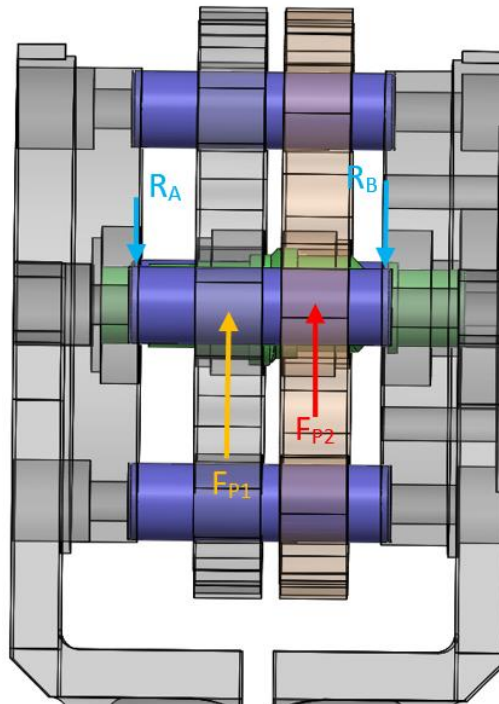


Fig. 59 Vista lateral de l'articulació cicloidal amb accions sobre els passadors

Tanmateix però, és sabut que cada disc cicloidal compta amb 24 dents o lòbuls ($n_d = 24$). Alhora, per poder generar el moviment, es troben desfasats entre sí per la distància d'una d'aquestes dents. Això provoca que l'angle d'aplicació sobre el passador sigui diferent per a cada disc, pel que apareix un angle de desfasament (β). Concretament, el desfasament entre F_{p1} i F_{p2} és de 15° , és a dir, una vint-i-quatrena part d'una revolució completa.

$$\beta = \frac{1 \text{ rev.}}{24 \text{ dents}} = \frac{2\pi \text{ rad}}{24} = \frac{\pi}{12} \text{ rad} = 15^\circ [1]$$

Tenint en compte aquest fet, es pot passar a l'anàlisi estàtic de forces sobre un dels passadors partint del diagrama anterior i de les dades conegudes. Aquest anàlisi serà extrapolable a qualsevols dels altres tres.

L'anàlisi es pot enfocar com si fos una biga doblement recolzada amb dues càrregues puntuals desiguals i situades asimètricament per cadascuna de les dues direccions que s'hauran d'analitzar. A causa del desfasament entre discs cicloidal, cal comprovar les sol·licitacions en els plans YZ i XZ . Com es veurà en els resultats obtinguts, els passadors estaran sotmesos a esforços de flexió i a tallant purs, els valors màxims dels quals s'agafaran com a cotes de dimensionament. A continuació es detalla tot el procediment de càlcul efectuat.

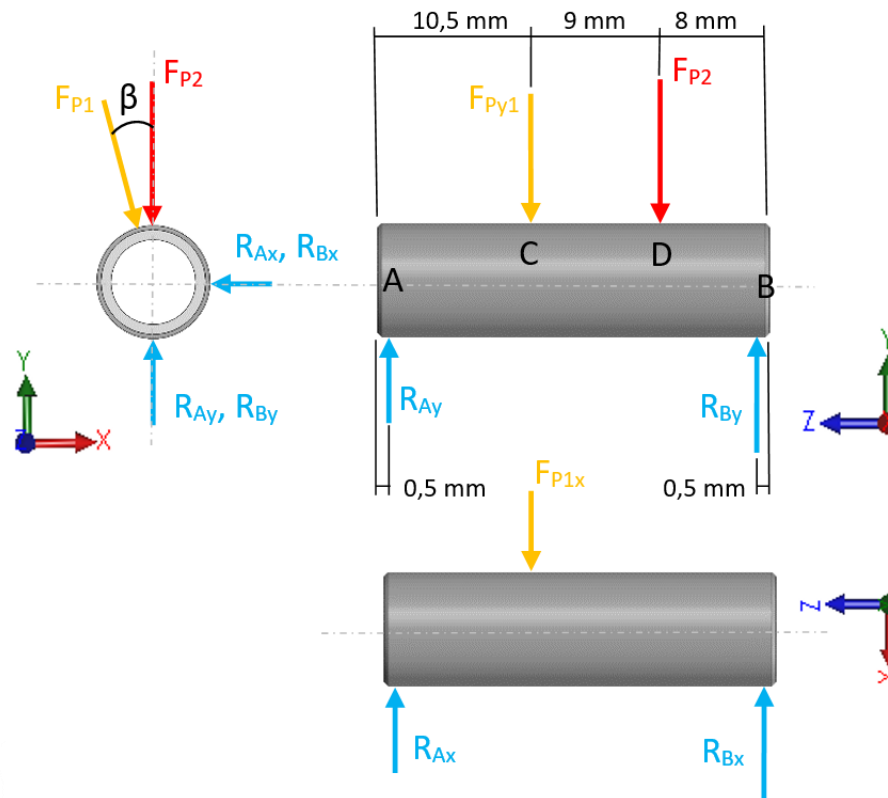


Fig. 60 Diagrama d'accions sobre el passador

- Dades inicials i càlcul de reaccions:** a partir de les dades conegudes, el diagrama de forces anterior i aplicant les condicions bàsiques de l'equilibri estàtic, es poden determinar els valors de les reaccions en els dos plans analitzats.

Dades inicials	
β [1]	15°
F_{P1}, F_{P2}	62,45 N
\varnothing_{ext}/D	8 mm
\varnothing_{int}/d	6 mm
σ_y	207 MPa

Taula 38. Dades inicials passador

$$\sum F = 0 \text{ [2]} \rightarrow \sum F_x = 0 \text{ [2.1]}; \sum F_y = 0 \text{ [2.2]}$$

$$\sum M_A = 0 \text{ [3]}$$

Pla d'anàlisi	Equacions	Resultats
Pla YZ	$F_{P1y} = F_P \cdot \cos(\beta) \quad [1]$ $F_{P2} = F_P$ $R_{Ay} + R_{By} = F_{P1y} + F_{P2} \quad [2.2]$ $F_{P1y} \cdot \overline{AC} + F_{P2} \cdot \overline{AD} = R_{By} \cdot \overline{AB} \quad [3]$	$F_{P1y} = 60,32 \text{ N}$ $F_{P2} = 62,45 \text{ N}$ $R_{Ay} = 55,23 \text{ N}$ $R_{By} = 67,54 \text{ N}$
Pla XZ	$F_{P1x} = F_P \cdot \sin(\beta) \quad [1]$ $R_{Ax} + R_{Bx} = F_{P1x} \quad [2.1]$ $F_{P1x} \cdot \overline{AC} = R_{Bx} \cdot \overline{AB} \quad [3]$	$F_{P1x} = 16,16 \text{ N}$ $R_{Ax} = 10,06 \text{ N}$ $R_{Bx} = 6,10 \text{ N}$

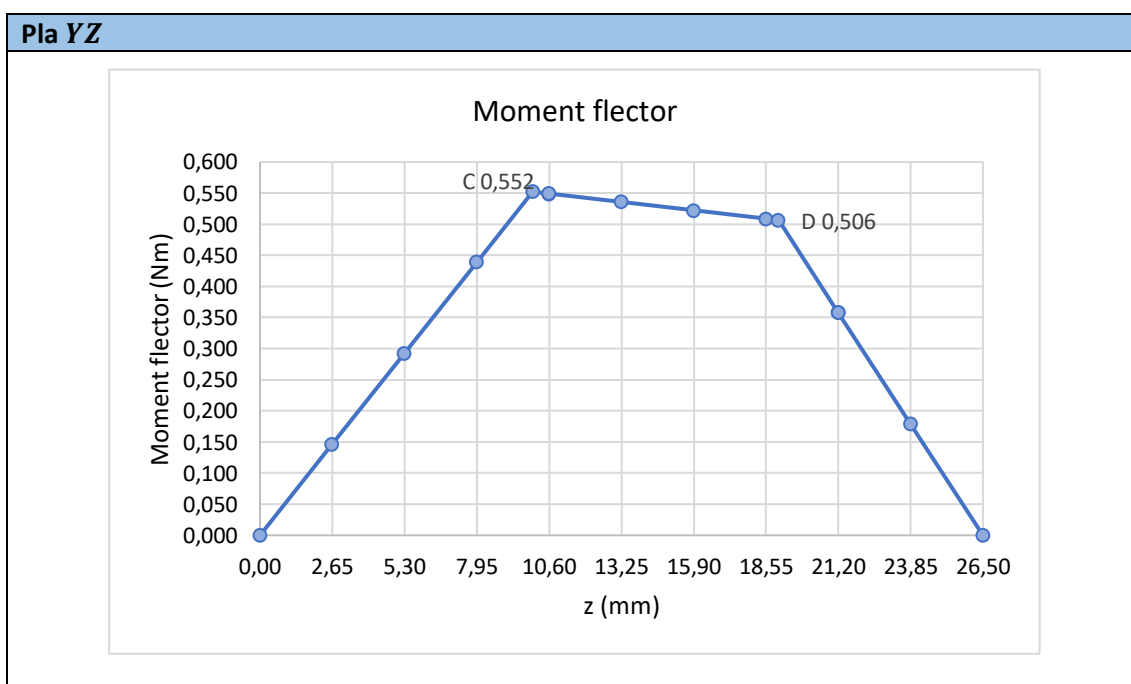
Taula 39. Equacions d'equilibri i components obtingues

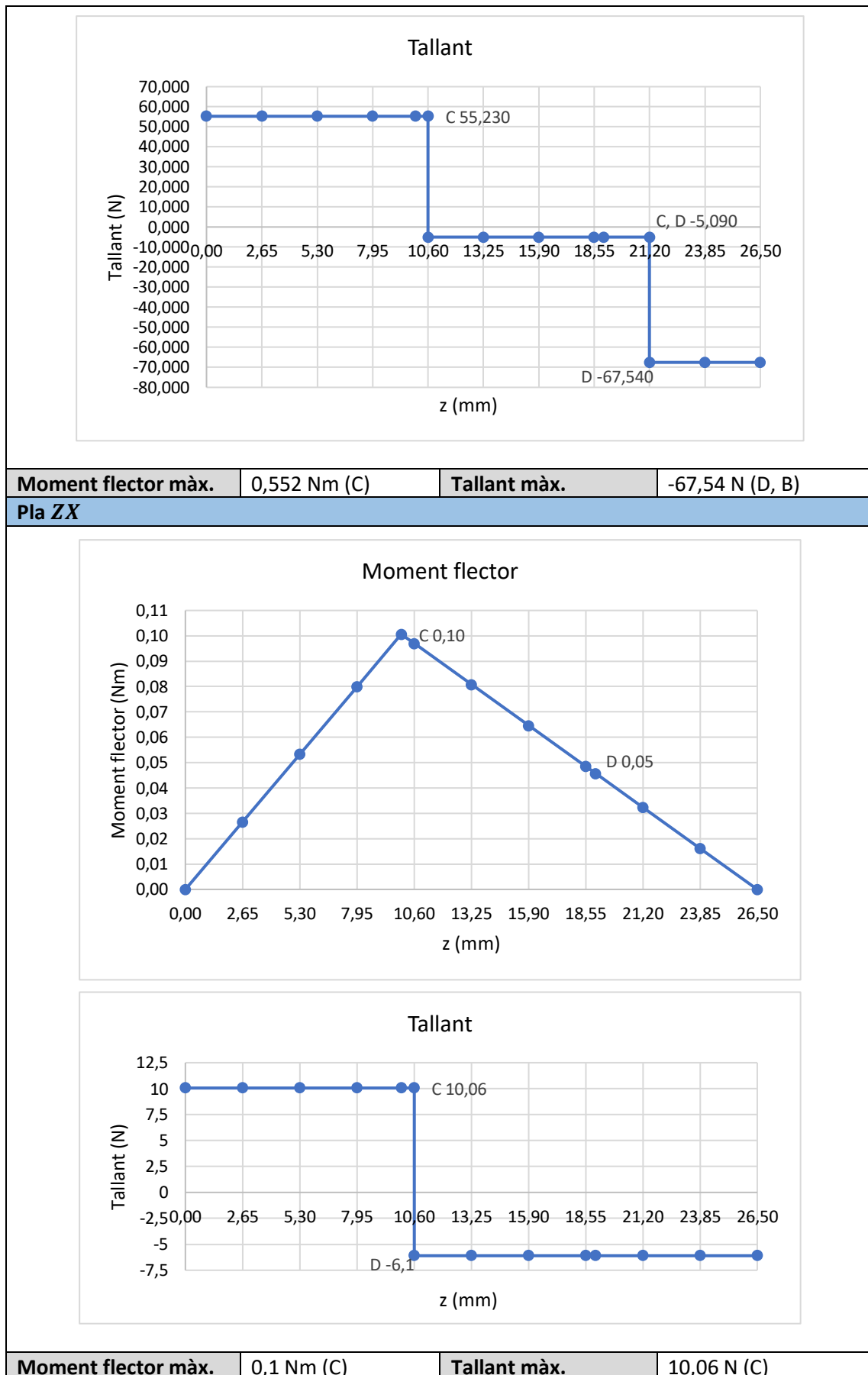
- Càlcul de moments flectors i tallants:** per comprovar la flexió en els passadors resulta imprescindible calcular les expressions del moment flector que actuen en cada secció de la peça.

Pla d'anàlisi	Tram	Moment flector	Tallant
Pla YZ	AC	$M_{AC} = R_{Ay} \cdot z$	$V_{AC} = R_{Ay}$
	CD	$M_{CD} = R_{Ay} \cdot z - F_{P1y}(z - \overline{AC})$	$V_{CD} = R_{Ay} - F_{P1y}$
	DB	$M_{DB} = R_{By}(\overline{AB} - z)$	$V_{DB} = -R_{By}$
Pla ZX	AC	$M_{AC} = R_{Ax} \cdot z$	$V_{AC} = R_{Ax}$
	CB	$M_{CB} = R_{Bx}(\overline{AB} - z)$	$V_{CB} = -R_{Bx}$

Taula 40. Equacions del moment flector i el tallant per cada tram del passador

- Elaboració de diagrames:** per visualitzar gràficament quina és la secció crítica s'elaborarà un diagrama de moments flectors i un diagrama d'esforços tallants per els dos plans analitzats.





Taula 41. Diagrames de moments flexors i tallants en cada pla analitzat

- 3. Designació de la secció crítica:** a partir dels diagrames, es pot observar molt clarament quina secció dels passadors està més sol·licitada. La que compta amb major nombre de sol·licitacions màximes és la secció C, situada a 10 mm de l'extrem recolzat del passador. Per tant, aquesta serà la denominada secció crítica. Caldrà comprovar la resistència d'aquesta secció a flexió i a tallant.

Secció crítica	C
Moment flector màx.	0,552 Nm
Tallant màx.	55,73 N

Taula 42. Selecció de la secció crítica del passador

- 4. Aplicació de les teories tensionals:** a partir de l'anàlisi estàtic anterior s'ha determinat que la secció crítica C es troba sotmesa a esforços purs de flexió i de tallants. A partir de l'aplicació de les següents teories tensionals, s'obté l'estat de tensions de la secció C.

- 4.1. Flexió:** la flexió s'avaluarà per mitjà de la llei de Navier:

$$\sigma_{m\grave{a}x.f} = \frac{M_F}{I_z} \cdot y = \frac{M_F}{W} \quad [4]$$

$$W = \frac{I_z}{y_{m\grave{a}x}} \quad [5]$$

$$I_z = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad [6]$$

$$y_{m\grave{a}x} = \frac{D}{2} \quad [7]$$

M_F = moment flector de la secció analitzada [Nm]

I_z = moment d'inèrcia de l'eix al voltant del qual es dona la flexió [m^4]

y = distància a la fibra neutra central a la que es mesura la tensió [m]

W = mòdul resistent [m^3]

D = diàmetre exterior [m]

d = diàmetre interior [m]

Treballant les equacions anteriors, la llei de Navier adaptada a una secció tubular és la següent:

$$\sigma_{m\grave{a}x.f} = \frac{32 \cdot M_F \cdot D}{\pi(D^4 - d^4)} \quad [8]$$

- 4.2. Esforços tallants:** les tensions tangencials derivades dels esforços tallants es calcularan a partir de la fórmula de Colignon:

$$\tau_{m\grave{a}x,t} = \frac{V \cdot m}{b \cdot I} \quad [9]$$

b = distància o gruix de la peça paral·lel a la fibra neutra [m]

V = tallant [N]

m = moment estàtic [m^3]

$I = \text{moment d'inèrcia } [m^4]$

Per al càlcul de les tensions tallants en seccions tubulars, a efectes pràctics, l'expressió s'expressa com:

$$\tau_{màx,t} = \frac{V}{A} = \frac{4 \cdot V}{\pi(D^4 - d^4)} \quad [10]$$

$A = \text{àrea de la secció } [m^2]$

Per altra banda, també s'han de tenir en compte les tensions tangencials tallants causades per la pròpia flexió, tot i que el seu valor acostuma a ser mínim.

$$\tau_{màx,f} = \frac{4V}{3A} = \frac{16 \cdot V}{3 \cdot \pi(D^4 - d^4)} \quad [11]$$

Les tensions finals obtingudes de l'aplicació de les expressions anteriors són les següents:

Pla	Tipus de tensió	Valor (MPa)
YZ	$\sigma_{màx,f}$ [8]	16,06
	$\tau_{màx,t}$ [10]	2,51
	$\tau_{màx,f}$ [11]	3,35
ZX	$\sigma_{màx,f}$ [8]	2,91
	$\tau_{màx,t}$ [10]	0,46
	$\tau_{màx,f}$ [11]	0,61

Taula 43. Tensions calculades en la secció crítica

Cal destacar que, en la part on les tensions normals degudes a la flexió són màximes, en la secció transversal paral·lela al pla analitzat, les tensions tangencials degudes als esforços tallants en aquell pla són nul·les. Per tant, s'analitzarà l'estat degut a la tensió normal màxima per la flexió en el pla YZ combinada amb la tensió tangencial provocada pel tallant en el pla ZX i pel propi moment flector.

Estat de tensions		
Pla	Tipus de tensió	Valor (MPa)
YZ	$\sigma_{màx,f}$	16,06
ZX	$\tau_{màx,t,f}$	1,07

Taula 44. Tensions màximes

5. **Estat de tensions:** a partir de les tensions calculades anteriorment es poden determinar les tensions principals de l'estat pla que en deriva; aquest procés parteix de la conformació del Cercle de Mohr, representació del qual s'ha obviat en aquest procediment de càlcul per simplificar-lo.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad [12]$$

$$\tau_{màx} = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad [13]$$

σ : tensió normal de l'estat pla de tensions [MPa]

τ : tensió tangencial de l'estat pla de tensions [MPa]

Tensions principals	
Tipus de tensió	Valor (MPa)
σ_1 [12]	16,13
σ_2 [12]	-0,071
$\tau_{m\grave{a}x}$ [13]	8,10

Taula 45. Tensions principals

6. **Teoria de fallada estàtica:** els passador analitzats estan fabricats en alumini Al 6061-T4. Així doncs, es tracta d'un material fonamentalment dúctil. Per aquest motiu, la tensió de fallada estàtica característica serà el seu límit de fluència (σ_y), propietat mecànica intrínseca del material. Per a l'aliatge d'alumini utilitzat, el límit de fluència es troba entorn els 207 MPa. A partir de l'aplicació de la teoria de la Tensió Tallant Màxima (teoria de Tresca) sobre l'estat tensional abans presentat, es podrà confirmar el correcte dimensionament del passador. En aquest cas, s'utilitzarà la tensió tallant màxima en comptes de l'hexàgon de Tresca.

$$\tau_y \approx \frac{\sigma_y}{2} \quad [14]$$

σ : limit a fluència del material

Donat que les tensions principals normals σ_1, σ_2 tenen signes diferents,

$$\tau_{m\grave{a}x} = \frac{|\sigma_{m\grave{a}x} - \sigma_{m\grave{m}n}|}{2} < \tau_y \rightarrow |\sigma_{m\grave{a}x} - \sigma_{m\grave{m}n}| < \sigma_y \quad [15]$$

Ahora, el coeficient o factor de seguretat de construcció del passador es pot deduir comparant el valor de tensió tangencial amb la tensió tangencial màxima,

$$FS = \frac{\tau_y}{\tau_{m\grave{a}x}} \quad [16]$$

FS : factor de seguretat

Resultats obtinguts	
Tensió tallant màxima (τ_y) [15]	103,50 MPa
Dimensionament ($ \sigma_{m\grave{a}x} - \sigma_{m\grave{m}n} < \sigma_y$) [15]	16,20 < 207 MPa
Factor de seguretat (FS) [16]	127,80

Taula 46. Resultats obtinguts del dimensionament

Donat que el FS es troba molt per sobre dels límits recomanats en materials dúctils, es pot concloure que el dimensionament dels passadors d'alumini és correcte.

7.2.4.2. Eix excèntric

El segon element mecànic que forma part de les articulacions cicloïdals i que s'ha designat com a crític és l'eix excèntric. Per al dimensionament d'aquest element central, es parteix del treball del treball de descomposició de forces realitzat anteriorment en l'articulació B.

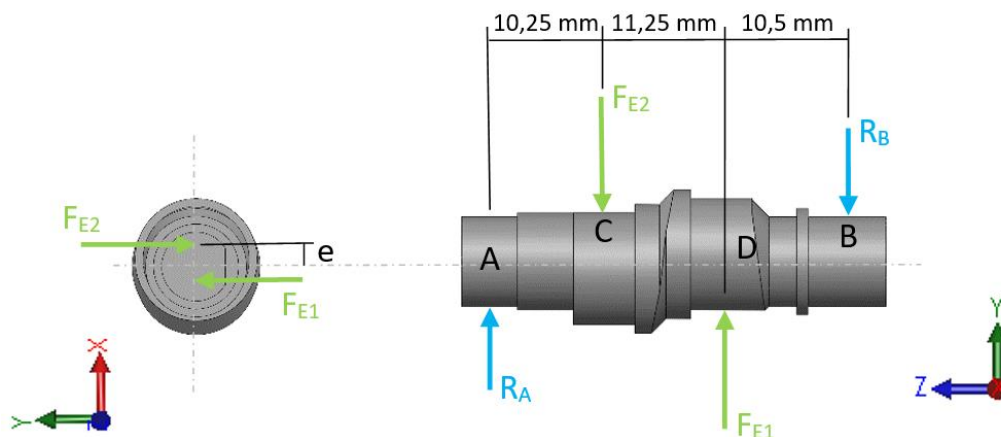


Fig. 61 Diagrama de forces sobre l'eix excèntric

- Dades inicials i càlcul de reaccions:** a partir de les dades conegudes, el diagrama de forces anterior i aplicant les condicions bàsiques de l'equilibri estàtic, es poden determinar els valors de les reaccions en els dos plans analitzats.

Dades inicials	
e	1 mm
F_{E1}, F_{E2}	213,35 N
$\varnothing_{C,D}$	10 mm
$\varnothing_{A,B}$	8 mm
A_A	50,27 mm ²
A_B	18,26 mm ²
$A_{C,D}$	78,54 mm ²
σ_y	45,6 MPa

Taula 47. Dades inicials eix

Cal denotar que sobre l'eix s'apliquen dues forces iguals (F_{E1}, F_{E2}), en sentit contrari i amb una certa excentricitat ($e/2$) respecte del centre. Tanmateix, si es desplacen per centrar-les sobre l'eix de rotació, es generarà un moment igual al producte del mòdul de la força per l'excentricitat total ($M_E = 2 \cdot F_E \cdot \frac{e}{2} = F_E \cdot e$). Aquest moment serà absorbit pels rodaments que subjecten l'eix, provocant la rotació del mateix i de l'encòder, doncs. Per tant, l'anàlisi estàtic de forces es pot realitzar obviant aquesta excentricitat.

$$\sum F = 0 [2] \rightarrow \sum F_x = 0 [2.1]; \sum F_y = 0 [2.2]$$

$$\sum M_A = 0 [3]$$

Pla d'anàlisi	Equacions	Resultats
Pla YZ	$F_E = F_{E1} = F_{E2}$ $R_A + F_{E1} = F_{E2} + R_B \quad [2.2]$ $F_{E2} \cdot \overline{AC} + R_B \cdot \overline{AB} = F_{E1} \cdot \overline{AD} \quad [3]$	$F_E = 213,35 \text{ N}$ $R_A = 75,01 \text{ N}$ $R_B = 75,01 \text{ N}$

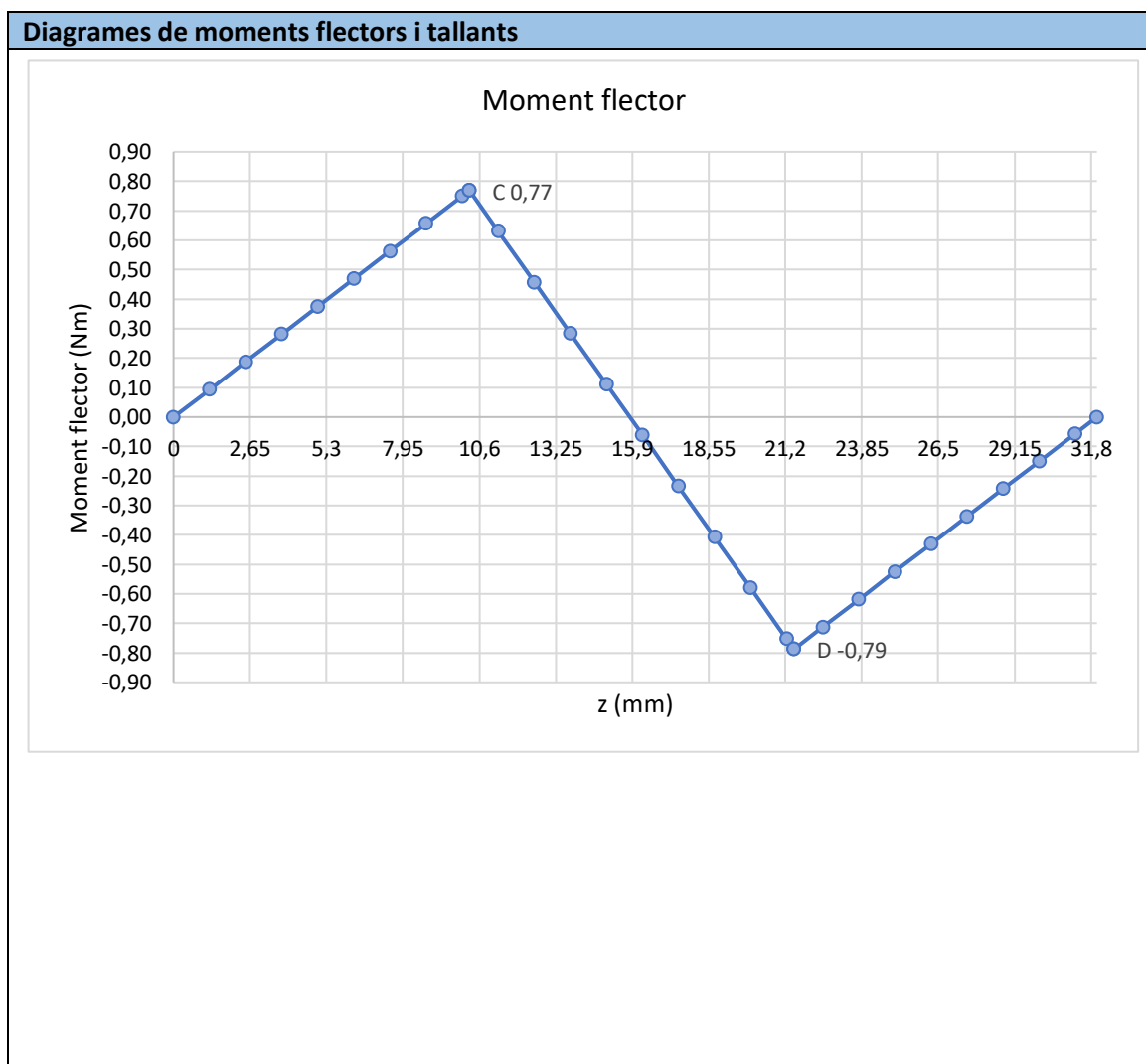
Taula 48. Equacions d'equilibri i components obtingudes

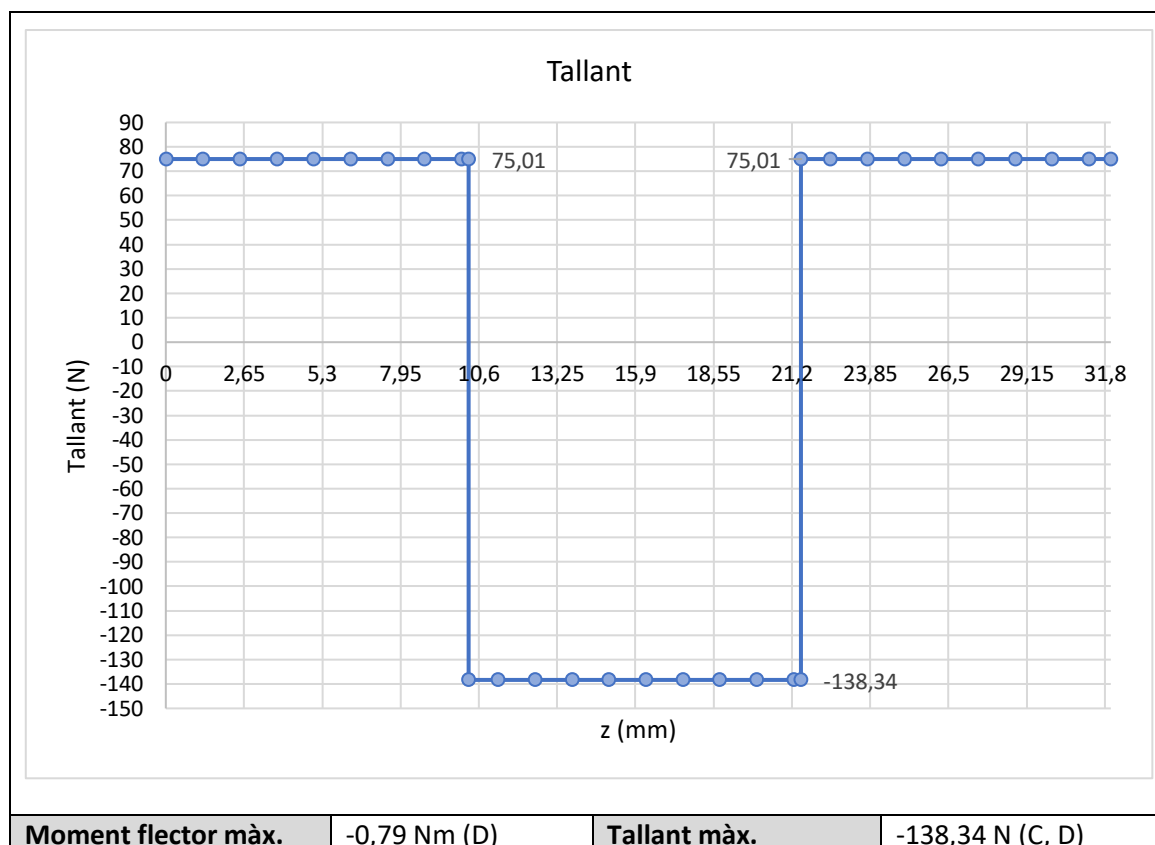
2. **Càlcul de moments flectors i tallants:** per comprovar la flexió en els passadors resulta imprescindible calcular les expressions del moment flector que actuen en cada secció de la peça.

Tram	Moment flector	Tallant
AC	$M_{AC} = R_A \cdot z$	$V_{AC} = R_A$
CD	$M_{CD} = R_A \cdot z - F_{E2}(z - \overline{AC})$	$V_{CD} = R_A - F_{E2}$
DB	$M_{DB} = R_B(\overline{AB} - z)$	$V_{DB} = -R_B$

Taula 49. Equacions del moment flector i tallant per cada tram de l'eix

3. **Elaboració de diagrames:** per visualitzar gràficament quina és la secció crítica s'elaborarà un diagrama de moments flectors i un diagrama d'esforços tallants per els dos plans analitzats.





Taula 50. Diagrames de moment flector i tallant en l'eix

4. **Designació de la secció crítica:** a partir dels diagrames, es pot observar molt clarament quina secció dels passadors està més sol·licitada. La que compta amb major nombre de sol·licitacions màximes és la secció D. Per tant, aquesta serà la denominada secció crítica. Caldrà comprovar la resistència d'aquesta secció a flexió i a tallant.

Secció crítica	D
Moment flector màx.	-0,79 Nm
Tallant màx.	-138,34 N

Taula 51. Selecció de la secció crítica de l'eix

5. **Aplicació de les teories tensionals:** a partir de l'anàlisi estàtic anterior s'ha determinat que la secció crítica D es troba sotmesa a esforços purs de flexió i de tallants. A partir de l'aplicació de les següents teories tensionals, s'obindrà l'estat de tensions de la secció D.

- 5.1. **Flexió:** la flexió s'avaluarà per mitjà de la llei de Navier:

$$\sigma_{m\grave{a}x.f} = \frac{M_F}{I_z} \cdot y = \frac{M_F}{W} \quad [4]$$

$$W = \frac{I_z}{y_{m\grave{a}x}} \quad [5]$$

$$I_z = \frac{\pi}{64} D^4 \quad [6]$$

$$y_{m\grave{a}x} = \frac{D}{2} \quad [7]$$

M_F = moment flector de la secció analitzada [Nm]
 I_z = moment d'inèrcia de l'eix al voltant del qual es dona la flexió [m^3]
 y = distància a la fibra neutra central a la que es mesura la tensió [m]
 W = mòdul resistent [m^2]
 D = diàmetre exterior [m]
 d = diàmetre interior [m]

Treballant les equacions anteriors, la llei de Navier adaptada a una secció circular massissa és la següent:

$$\sigma_{màx.f} = \frac{32 \cdot M_F}{\pi D^3} \quad [8]$$

5.2. Esforços tallants: les tensions tangencials derivades dels esforços tallants es calcularan a partir de la fórmula de Colignon:

$$\tau_{màx,t} = \frac{V \cdot m}{b \cdot I} \quad [9]$$

b = distància o gruix de la peça paral·lela a la fibra neutra [m]
 V = tallant [N]
 m = moment estàtic [m^3]
 I = moment d'inèrcia [m^4]

Per al càlcul de les tensions tallants en seccions circulars, a efectes pràctics, l'expressió s'expressa com:

$$\tau_{màx,t} = \frac{V}{A} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad [10]$$

A = àrea de la secció [m^2]

Per altra banda, també s'han de tenir en compte les tensions tangencials tallants causades per la pròpia flexió, tot i que el seu valor acostuma a ser mínim.

$$\tau_{màx,f} = \frac{4V}{3A} = \frac{16 \cdot V}{3 \cdot \pi \cdot D^2} \quad [11]$$

Les tensions finals obtingudes de l'aplicació de les expressions anteriors són les següents:

Tipus de tensió	Valor (MPa)
$\sigma_{màx.f}$ [8]	8,05
$\tau_{màx,t}$ [10]	1,76
$\tau_{màx,f}$ [11]	2,35

Taula 52. Tensions calculades en la secció crítica

- 6. Estat de tensions:** cal destacar que, en la part on les tensions normals degudes a la flexió són màximes, en la secció transversal paral·lela al pla analitzat, les tensions tangencials degudes als esforços tallants en aquell pla són nul·les. Per tant, el que s'ha obtingut és l'estat pla de tensions que conté les tensions principals. Per tant, es pot aplicar la següent correlació del Cercle de Mohr:

$$\tau_{màx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad [12]$$

Tensions principals	
Tipus de tensió	Valor (MPa)
σ_1	8,05
σ_2	0
$\tau_{m\grave{a}x}$ [12]	4,03

Taula 53. Tensions principals

7. Teoria de fallada estàtica: els eixos analitzats estan fabricats per impressió en FDM utilitzant PLA. Així doncs, es tracta d'un material polimèric i fonamentalment dúctil. Per aquest motiu, la tensió de fallada estàtica característica serà el seu límit de fluència (σ_y), propietat mecànica intrínseca del material. Per al PLA, el límit de fluència es troba entorn els 45,6 MPa.

A partir de l'aplicació de la teoria de la Tensió Tallant Màxima (teoria de Tresca) sobre l'estat tensional abans presentat, es podrà confirmar el correcte dimensionament del passador. En aquest cas, s'utilitzarà la tensió tallant màxima en comptes de l'hexàgon de Tresca.

$$\tau_y \approx \frac{\sigma_y}{2} \quad [13]$$

σ : limit a fluència del material [MPa]

Donat que les tensions principals normals σ_1, σ_2 tenen el mateix signe,

$$\tau_{m\grave{a}x} = \frac{|\sigma_{m\grave{a}x}|}{2} < \tau_y \rightarrow |\sigma_{m\grave{a}x}| < \sigma_y \quad [14]$$

Ahora, el coeficient o factor de seguretat de construcció del passador es pot deduir comparant el valor de tensió tangencial amb la tensió tangencial màxima,

$$FS = \frac{\tau_y}{\tau_{m\grave{a}x}} \quad [15]$$

FS : factor de seguretat

Resultats obtinguts	
Tensió tallant màxima (τ_y) [13]	22,8 MPa
Dimensionament ($ \sigma_{m\grave{a}x} < \sigma_y$) [14]	8,05 < 45,6 MPa
Factor de seguretat (FS) [15]	5,7

Taula 54. Resultats obtinguts del dimensionament de l'eix

Donat que el FS es troba entorn els límits recomanats en materials dúctils, es pot concloure que el dimensionament dels passadors d'alumini és correcte. Tanmateix, a causa de les implicacions en la resistència mecànica dels eixos derivades de la impressió per FDM, s'han elaborat una sèrie d'assajos experimentals per comprovar in situ el correcte dimensionament dels elements (8. Fase experimental).

7.2.4.3. Rodaments de l'articulació

Els rodaments de boles s'han utilitzat de forma recurrent en el present projecte per materialitzar el prototip de BAMC. De fet, en cadascuna de les unitats articulars cicloïdals (A, B i C), hi ha 6 rodaments (3 parells diferents). Aquests s'encarreguen de permetre el moviment relatiu de revolució entorn els elements que uneixen evitant un frec excessiu.

El moviment relatiu entre elements giratoris es preveu, a efectes pràctics, nul o mínim ($< 10 \text{ min}^{-1} =$

10 rpm). Per tant, es considerarà que els rodaments es troben sotmesos a una sol·licitació estàtica. Per això, s'avaluarà el dimensionament d'aquests elements per mitjà del coeficient de càrrega estàtica (C_0), tot definint un factor d'esforços estàtics (f_s). Així es demostrarà que s'ha elegit un rodament amb suficient capacitat de càrrega.

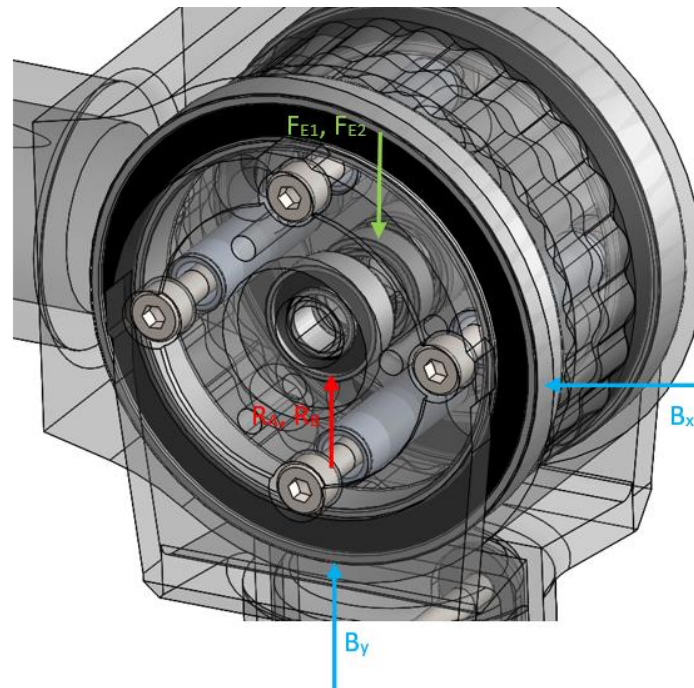


Fig. 62 Disposició dels rodaments de l'articulació i càrregues que els afecten

Tot el procediment de càlcul adjunt, les expressions utilitzades i els valors dels coeficients aplicats, s'ha extret del catàleg industrial de rodaments de les empreses fabricants FAG i ISB [16, 17]. Les taules emprades es recullen en els annexes (*Annex 6 – Taules rodaments*). Per establir equivalències entre els models propis i els utilitzats en el projecte (d'un altre fabricant), s'ha tingut en compte la tipologia i les dimensions dels rodaments. En aquests cas, tots els rodaments són rígids de boles, però incorporen proteccions auxiliars diverses.

- 1. Caracterització del rodament:** el primer pas en el dimensionament d'un rodament sota una sol·licitació estàtica és la seva caracterització. Cal determinar-ne les característiques a partir de la nomenclatura (codificada) donat que la majoria de paràmetres de càlcul tabulats van en funció d'aquestes. La codificació dels rodaments contempla 4 criteris o normes en funció del diàmetre intern. Aquestes diferencien la sèrie (tipologia) del nombre característic de l'orifici que en determina el diàmetre intern.
- 2. Factor d'esforços estàtics (f_s):** aquest element s'agafa com a valor de seguretat contra deformacions massa elevades en els punts de contacte dels cossos rodants. Per rodaments que hagin de funcionar amb gran suavitat i facilitat, s'haurà d'elegir un factor d'esforços estàtics (f_s) superior a si les exigències són més reduïdes. En general, aquests seran els valors de referència:

$$f_s = \frac{C_0}{P_0} [1]$$

f_s : factor d'esforços estàtics [kN]

C_0 : capacitat de càrrega estàtica [kN]

P_0 : càrrega estàtica equivalent [kN]

Valors típics del factor de seguretat (f_s)	
Requeriments de disseny	Valor (f_s)
Exigències elevades	$f_s = 1,5 \dots 2,5$
Exigències normals	$f_s = 1,0 \dots 1,5$
Exigències reduïdes	$f_s = 0,7 \dots 1,0$

Taula 55. Valors Típics del factor de seguretat en rodaments

3. **Capacitat de càrrega estàtica (C_0):** la capacitat de càrrega estàtica està recollida en les taules per a cada rodament segons la norma DIN ISO 76-1988. Aquesta càrrega (radial en els rodaments radials i axial en els axials) produirà una pressió superficial p_o de:

Pressió superficial típica (p_o)	
Tipus de rodaments	Valor (MPa)
Boles (oscil·lant)	4600
Boles (gral.)	4200
Rodets	4000

Taula 56. Pressió superficial típica

Teòricament, sota una sol·licitació C_0 (corresponent a $f_s = 1, C_0 = P_0$) s'origina una deformació plàstica total de l'element rodant i del camí de rodada d'aproximadament 1/10000 del diàmetre de l'element rodant en l'àrea de contacte més carregada.

A partir dels punts 1, 2 i 3 del procediment de càlcul i fent ús de les taules pertinents, s'han determinat els següents valors de càrrega estàtica (C_0):

Caracterització dels rodaments					
Rodament	Codificació		Característiques		C_0 [kN]
688 – 2RS	Norma	1	D (ext.)	16 mm	0,5
	Sèrie	68	d (int.)	8 mm	
	Nº caracte.	8	Tipologia	De boles, sellat per fricció, de FKM, en ambdós flancs	
	Tipus	2RS			
6700 - ZZ	Norma	2	D (ext.)	15 mm	0,43
	Sèrie	67	d (int.)	10 mm	
	Nº caracte.	00	Tipologia	De boles, amb placa de protecció metàl·lica en ambdós flancs	
	Tipus	ZZ			
6810 – 2RS	Norma	3	D (ext.)	65 mm	6,3
	Sèrie	68	d (int.)	50 mm	
	Nº caracte.	10	Tipologia	De boles, sellat per fricció, de FKM, en ambdós flancs	
	Tipus	2RS			

Taula 57. Caracterització dels rodaments del BAMC

4. **Determinació de sol·licitacions:** a partir d'un estudi estàtic de forces cal determinar les components o accions que afecten directament als rodaments situats en el muntatge. Tanmateix, per al present dimensionament s'aprofitarà el treball realitzat en els processos de dimensionament d'eixos excèntrics i passadors (apartats 7.2.4.1 i 7.2.4.2).

Sol·licitacions sobre els rodaments		
Rodament	Càrregues (N)	
688 – 2RS	F_r (radial)	$R_A, R_B = 75,01$
	F_a (axial)	0
6700 – ZZ	F_r (radial)	$F_E = 213,35$
	F_a (axial)	0
6810 – 2RS	F_r (radial)	$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = 14,35$ per $\alpha = 90^\circ$ en l'art. B
	F_a (axial)	0

Taula 58. Sol·licitacions aplicades als rodaments a partir de càlculs anteriors

5. **Càrrega estàtica equivalent (P_o):** la càrrega estàtica equivalent és un valor teòric de càrrega axial (rodaments axials) o radial (rodaments radials) que origina el mateix efecte o sol·licitació en el punt de contacte més carregat (punt crític) entre cossos rodants i camí de rodada que la pròpia càrrega combinada real. Els valors dels factors estàtics de càrrega X_o, Y_o així com informació sobre el càlcul de la càrrega estàtica equivalent (P_o) venen recollits indicat en les taules dels fabricants de rodaments.

$$P_o = X_o \cdot F_r + Y_o \cdot F_a \quad [2]$$

P_o : càrrega estàtica equivalent [kN]

F_r : càrrega radial [kN]

F_a : càrrega axial [kN]

X_o : factor radial estàtic

Y_o : factor axial estàtic

En el cas del dimensionament sota càrregues estàtiques,

$$P_o = F_r \text{ per } \frac{F_a}{F_r} \leq 0,8 \quad [2.1]$$

$$P_o = 0,6 \cdot F_r + 0,5 \cdot F_a \text{ per } \frac{F_a}{F_r} > 0,8 \quad [2.2]$$

Seguint el procediment de càlcul exposat, aquests són els resultats obtinguts:

Càlculs de dimensionament de rodaments					
Rodament	Càrregues (N)		P_o (N) [2.2]	C_o (N)	f_s [1]
688 – 2RS	F_r (radial)	$R_A, R_B = 75,01$	45,01	500	11,10
	F_a (axial)	0			
6700 – ZZ	F_r (radial)	$F_E = 213,35$	128,01	430	3,36
	F_a (axial)	0			
6810 – 2RS	F_r (radial)	$B = 14,35$	8,61	6300	731,70
	F_a (axial)	0			

Taula 59. Càlculs i resultats del dimensionament estàtic dels rodaments

Els factors de seguretat estàtica o d'esforços estàtics (f_s) presenten valors força elevats, molt superiors als recomanats per a càrregues o requeriments molt exigents. Per tant, es pot concloure que els rodaments es troben sobredimensionats respecte de les sol·licitacions que experimenten. Així doncs, no patiran cap mena de desgast ni problema de funcionament derivat de les accions aplicades durant la utilització del BAMC.

8. Fase experimental

En aquest punt del projecte es desenvolupa la segona gran vessant de l'Enginyeria d'Execució, aquella enfocada a l'experimentació i la simulació dels diferents components dissenyats. Aquesta etapa del projecte serveix per caracteritzar el comportament i ajustar el dimensionament en base a les sol·licitacions implícites en el funcionament del braç de mesura. Aquest apartat permet, prèviament a la construcció del prototip de BAMC final, assegurar que els components resisteixen i poden funcionar sota les condicions reals. Per altra banda, en reiterades ocasions, s'ha utilitzat la metodologia de l'assaig i l'experimentació per determinar valors líndars de sol·licitacions; alhora, aquests han servit per conduir i comprovar els processos de càlcul necessari per al dimensionament dels components mecànics del braç.

8.1. Antecedents de la resistència en la impressió per FDM

Durant els darrers anys s'ha avançat molt en l'estudi d'aquest procés de fabricació i en la caracterització del comportament de les peces que s'hi obtenen. Tanmateix, l'elevat grau de personalització que permet la impressió 3D provoca que no hi hagi un estàndard concret envers teories de deformació, tensionals i de fallada, estàtica o dinàmica.

La pròpia metodologia d'impressió FDM provoca que les peces impreses no es comportin com a cossos massissos; per tant, les teories tensionals clàssiques resulten difícils d'aplicar. L'anisotropia esdevé també una particularitat molt marcada de les peces produïdes per impressió 3D, en relació a l'orientació de les capes disposades.

Per altra banda, tot i que el PLA és, a priori, un material dúctil i tenaç, un cop s'ha conformat per FDM, la peça resultant tendeix a comportar-se com un material fràgil, experimentant deformacions mínimes abans de la ruptura. Igualment, els paràmetres d'impressió utilitzats, tals com el patró de farciment, les temperatures o l'*infill*, entre altres, afecten directament a les capacitats resistives de les peces. Si a totes les variables anteriors s'afegeix el fet que el BAMC projectat inclou geometries més o menys complexes, sobretot en la zona de les articulacions, el dimensionament dels elements dissenyats esdevé molt difícil.

Per tal de poder avaluar les propietats i el comportament mecànic de les peces fabricades, s'han projectat una sèrie d'assaigs. Aquests es fonamenten en el treball previ de recerca i experimentació de diversos autors en l'àmbit de la resistència mecànica de peces fabricades per impressió 3D. Tanmateix, la conclusió generalitzada a la que s'acostuma a arribar és igual a la problemàtica que es busca solucionar; la caracterització del comportament i les propietats mecàniques d'una peça impresa en 3D és una tasca difícil. En qualsevol cas, resulta convenient repassar resumidament els resultats i les conclusions a les que ja s'ha arribat en aquest camp.

A [18] s'analitza la resistència a la fractura i l'adhesió entre capes d'una mateixa peça impresa en 3D, amb diferents tipus de plàstics i amb un percentatge de farciment (*infill*) del 100%. Els assaigs es realitzen en un laboratori utilitzant una màquina MTS de prova de tensió de materials, la qual permet mesurar els esforços de tracció, compressió i flexió sobre qualsevol peça. L'estudi conclou que tant la resistència a la fractura com l'adhesió entre capes augmenta proporcionalment amb la temperatura d'impressió.

Aquesta font [18] també recull un altre exemple d'estudi de resistència de peces impreses en 3D. En aquest cas, es sotmeten peces de plàstic de tipus PLA amb diferents geometries, orientació de capa i patrons de rebliment (totes al 100%) a esforços de tracció. Com a resultat s'obté l'efecte que té el patró de farciment i la seva direcció sobre la fractura que es produeix en trencar-se les peces a tracció. En observar les fractures a nivell microscòpic, denoten que les peces impreses amb un patró

de farciment paral·lel a la longitud major de l'espècimen o perpendicular entre una capa i la següent, experimenten una major deformació plàstica abans del trencament que les que estan impreses en direcció transversal a la longitud principal de l'espècimen. És a dir, aquestes darreres tenen una fractura més plana i amb menys deformació plàstica pel que es comporten, doncs, com un material més fràgil. Les primeres presenten l'equivalent a un comportament dúctil.

L'article [19] té com a objectiu l'estudi de l'efecte de l'orientació, l'espessor de capa i la taxa d'alimentació (*flow*) en el comportament mecànic de peces impreses amb plàstic de tipus PLA. Per això, es sotmeten a esforços de tracció i flexió. Les peces impreses en direcció vertical, però amb les capes en paral·lel a la base de la impressora, són les que pitjors característiques mecàniques mostren. Les peces impreses de cantell i amb les capes en paral·lel a la plataforma d'impressió, així com les impreses amb la longitud més llarga sobre la base de la impressora i les capes també paral·leles a aquesta, esdevenen les que expressen millors característiques mecàniques. D'altra banda, observen que la ductilitat decreix conforme augmenta el gruix de capa i la taxa d'alimentació de material. A més, les propietats mecàniques augmenten a mesura que s'incrementa el gruix de la capa i disminueixen quan augmenta la taxa d'alimentació per a l'orientació vertical.

A més de tots els paràmetres que es necessiten conèixer per dissenyar correctament el procés d'impressió, també cal tenir en compte que no s'ha d'excedir ni en quantitat de plàstic ni en temps d'impressió. Es coneix el fet que un dels problemes de la impressió 3D és el temps. Això és el que s'analitza a l'article [20], on s'estableix una relació clara entre diferents patrons de farciment, propietats mecàniques i temps d'impressió en peces impreses amb plàstic de tipus ABS. Aquest estudi servirà de guia per seleccionar el disseny òptim de farciment en funció de la resistència requerida i el cost d'impressió (relació temps – energia) associat.

A [21] s'exposa una anàlisi mecànica de peces impreses en 3D amb plàstic de tipus PLA obtingudes amb una impressora 3D de baix cost. Els espècimens utilitzats tenen el mateix patró de farciment (al 100%) i es va canviant l'orientació de les capes (0°, 45° i 90°). Les proves realitzades consisteixen en sotmetre'ls a diferents esforços de tracció, flexió i fatiga. La peça més forta a tracció (estudi estàtic) esdevé la que presenta una orientació de les capes de 45°, assolint un valor de tensió màxim igual a 64 MPa abans de trencar-se. En canvi, per a la fatiga del material (estudi dinàmic), s'obtenen valors similars entre les orientacions de 0° i 45°, sent la de 90° la que pitjor es comporta amb força diferència de les anteriors.

Vistes les conclusions proporcionades per les diferents fonts consultades, es confirmen les assumpcions realitzades en la introducció d'aquest apartat; resulta complicat en l'actualitat conèixer amb exactitud les característiques mecàniques d'una peça impresa per FDM. Aquestes depenen d'una multitud de factors, com són ara la temperatura (tant d'impressió com de l'ambient i de la plataforma), el tipus de material, el patró i percentatge de farciment, l'alçada de capa, etc. Definitivament, no es pot exigir un sol estàndard d'assaig i dimensionament envers la resistència mecànica pel que encara no existeix cap conveni normalitzador a nivell internacional.

8.2. Determinació dels paràmetres de farciment òptims

Com s'ha pogut veure al llarg de la memòria, la majoria de peces estructurals i funcionals que conformen el BAMC projectat s'obtenen per mitjà de la impressió tridimensional per FDM a partir de filament de PLA. D'entre els diferents paràmetres que controlen aquest procés d'addició, la definició òptima del farciment o rebliment (*infill*) en termes d'orientació, densitat i patró o tipologia, resulta especialment rellevant. Aquestes especificacions tenen un impacte directe en la resistència

mecànica de les peces fabricades. En aquest assaig, es determinarà a partir de l'experimentació quina composició d'aquests paràmetres és la més recomanable per construir el braç de mesura.

8.2.1. Objectius

A través del programari o *slicer* utilitzat (*UltiMaker Cura*) es poden fixar les característiques del rebliment de la peça envers l'orientació de les capes depositades (modificant l'orientació de la peça), la densitat de farciment (en percentatge), i el patró. Així doncs, el present assaig busca esclarir els següents pretexts:

- Determinar la configuració de paràmetres de farciment (densitat i patró) òptims per a la impressió en FDM, utilitzant PLA, envers la seva resistència mecànica general.
- Determinar la relació entre la resistència als esforços mecànics de tracció, flexió i compressió, i els paràmetres de farciment.
- Utilització d'un procés d'assaig senzill, estàndard i de paràmetres controlables que eviti la variabilitat deguda a factors no mesurables.
- Estudi de les afectacions en la quantitat de material i el temps d'impressió (recursos) en relació a la resistència mecànica derivada dels paràmetres de farciment.

8.2.2. Planificació

L'assaig es realitzarà aplicant 3 tipologies d'esforços mecànics (tracció, flexió i compressió), a fallada, sobre una proveta estandarditzada (de creació pròpia) de dimensions 70x20x10 mm. Alhora compta amb un orifici de $\varnothing 4$ mm en cada extrem per la seva subjecció. Per cada cas, aquesta proveta serà impresa en PLA amb els paràmetres de farciment requerits, mentre que la resta de paràmetres d'impressió es mantindran constants.

Els esforços analitzats, s'aplicaran en forma de càrrega estàtica per mitjà de pesos, i es realitzarà cada assaig en el format de fallada estàtica; és a dir, s'anirà augmentant la càrrega en un mateix punt fins que la proveta trenqui o perdi la conformitat estructural. La càrrega última abans de que es doni la fallada serà la registrada als resultats (càrrega màxima).

Tot i que les sol·licitacions reals en l'ús del BAMC són força més complexes i producte d'una combinatòria d'esforços purs, l'assaig en les dimensions de la tracció, la flexió i la compressió proporcionen una idea general de la resistència del material.

L'assaig es dividirà en 2 parts diferenciades, una per cadascun dels paràmetres a analitzar (densitat i patró). Tanmateix, es fixarà sempre un dels dos paràmetres mentre que s'anirà variant l'altre.

Això permet aïllar cadascun d'aquests factors i relacionar-los directament amb les propietats mecàniques que en deriven. Alhora, per cada parts, es necessitaran diferents provetes (una per cada tipus d'esforç aplicat).

- Assaig A (densitat):** en aquest assaig inicial es determinarà la densitat de rebliment òptima en intervals acotats. Es comprovarà la resistència a tracció, a compressió i a flexió. S'utilitzaran 5 intervals de densitat definits, en augments del 20% (20%, 40%, 60%, 80% i 100%). El patró de farciment es fixarà en el de tipus giroide.
- Assaig B (patró):** en aquest assaig es determinarà el patró de farciment més resistent d'entre els possibles. Es comprovarà la resistència a tracció, a compressió i a flexió. D'entre totes les possibilitats, a partir del treball previ realitzat [20], s'ha optat per avaluar només els patrons triangular, cúbic, reixa i giroide. La densitat de farciment es mantindrà constant en un 20%.

8.2.3. Muntatge experimental

El muntatge experimental serà el mateix per cadascuna de les proves que es realitzaran, i anirà en funció del tipus d'esforç a aplicar.

Assaig a tracció



Assaig a flexió



Assaig a compressió



Taula 60. Muntatge experimental de l'assaig

8.2.4. Resultats

A partir de la realització de 24 proves d'esforç mecànic diferents, amb les respectives provetes caracteritzades en funció dels paràmetres de farciment, s'ha obtingut una sèrie esclaridora de resultats.

Assaig A – Densitat de farciment (%)					
Patrò de farciment: giroide (ctnt.)					
Densitat (%)	Temps impressió (h)	Quantitat PLA (g)	Càrrega màx. tracció (N)	Càrrega màx. flexió (N)	Càrrega màx. compressió (N)
20	0,983	9	1470	294	+1960*
40	1,317	11	1519	343	+1960*
60	1,983	13	1519	343	+1960*
80	2,317	15	1568	343	+1960*
100	2,917	17	1568	392	+1960*
Assaig B – Patrò de farciment					
Densitat de farciment: 20% (ctnt.)					
Patrò	Temps impressió (h)	Quantitat PLA (g)	Càrrega màx. tracció (N)	Càrrega màx. flexió (N)	Càrrega màx. compressió (N)
Triangular	0,933	9	1078	196	+1960*
Cúbic	0,916	9	980	196	+1960*
Reixa	0,9	9	882	98	1764
Giroide	0,983	9	1470	294	+1960*

Taula 61. Resultats de l'assaig

*No s'ha arribat a la fallada de la proveta (càrrega insuficient).

Relació paràmetres de farciment – temps impressió – consum material					
		Temps		Quantitat de material	
		Valor (h)	Variació (%)	Valor (g)	Variació (%)
Densitat de farciment (%)	20	0,983	-	9	-
	40	1,317	33,98	11	22,22
	60	1,983	101,73	13	44,44
	80	2,317	135,71	15	66,67
	100	2,917	196,74	17	88,89
Patrò de farciment	Reixa	0,9	-	9	-
	Cúbic	0,916	1,78	9	0,00
	Triangular	0,933	3,67	9	0,00
	Giroide	0,983	5,36	9	0,00

Taula 62. Relació paràmetres farciment – temps impressió – material consumit

8.2.4.1. Incís en la metodologia i les unitats

Si més no, el procediment més habitual en l'experimentació i l'assaig de sol·licitacions passa per expressar els valors resultants en termes d'esforços mecànics (tensió) com a tal, per poder-los relacionar amb les propietats mecàniques del material. En aquest cas però, s'ha optat per utilitzar els valors primaris experimentals, en unitats de càrrega o força (N), pels motius exposats a continuació:

6. **Secció no real:** donat que precisament els paràmetres avaluats són la densitat i el patró de rebliment, calcular la secció de la proveta en termes d'àrea és molt difícil. En cap cas existeix una secció uniforme com a tal.
7. **Condicions de realització:** els assaigs realitzats es basen en l'aplicació d'una massa (pes o força de gravetat) variable en diferents direccions o configuracions per analitzar esforços mecànics purs. Així doncs, resulta pràctic expressar els resultats obtinguts directament.
8. **Abast i objectius:** cal tenir en compte que aquest assaig només busca determinar la configuració de paràmetres de farciment òptima per a la fabricació de les peces del BAMC. No és un experiment exclusiu d'investigació en materials enfocat a la divulgació.
9. **Simplificació i interpretació:** no haver de realitzar càlculs ni expressar els resultats en altres unitats permet una interpretació més fàcil i directa. Això facilita la comprensió dels resultats i la obtenció d'una conclusió.

8.2.5. Conclusions

A partir dels resultats anteriors, es poden extreure diverses conclusions força esclaridores envers els paràmetres de farciment en la impressió per FDM en PLA. En aquest cas s'han dividit en els sectors principals d'interès:

a. Relació paràmetres i temps d'impressió

Entre els dos paràmetres de farciment analitzats (densitat i patró), s'ha observat que el paràmetre més determinant envers el temps d'impressió és la densitat. A major percentatge de farciment, per a una mateixa proveta, més gran és el temps empleat per la impressió. Entre el temps necessari per una densitat del 20% i del 100%, per una mateixa peça, hi ha una variació decreixement de gairebé el 200%. Pel contrari, la màxima variació temporal assolida entre els diferents patrons és de poc més del 5%.

b. Relació paràmetres i quantitat de material

Entre els dos paràmetres de farciment analitzats (densitat i patró), s'ha observat que el paràmetre més determinant envers la quantitat de material (PLA) és, també, la densitat. Amb l'augment del percentatge de farciment, augmenta substancialment la quantitat de material requerida en una raó del 22,22% en massa per cada 20% de densitat. Així doncs, per una densitat del 100% es consumeix un 88,88% de PLA que per a una densitat del 20%, en una mateixa peça.

Per altra banda, s'ha observat que el patró de rebliment té un afectació nul·la en la quantitat de material imprès. És a dir, per qualsevol dels patrons avaluats, el consum de PLA ha estat el mateix.

c. Implicacions de la densitat de farciment en la resistència

La resistència mecànica, sobretot envers els esforços de tracció i flexió, es veu afectada per la densitat de farciment, però no d'una forma molt notable. La diferència de resistència a tracció entre el 20% i el 100% és de tan sols 98 N (10 kg). En la flexió passa quelcom semblant, de fet la diferència de càrrega màxima entre els percentatges del 20% i del 100% també és de 98 N, però amb uns valors molt inferiors. En el cas de la compressió, no s'ha pogut arribar en cap cas a la fallada de la proveta per la falta de càrrega.

d. Implicacions del patró de rebliment en la resistència

El patró de farciment resulta afectar de forma més agreujada a la resistència mecànica de les provetes que la densitat. El giroide i el patró triangular esdevenen les geometries més resistents, amb un 20% de densitat, molt per sobre de la resta; en concret el giroide és el patró mecànicament més resistent, mentre que el patró de reixa presenta unes prestacions molt baixes en comparació a la resta; de fet, la proveta en reixa ha estat l'única que ha assolit la fallada per compressió.

e. Caracterització mecànica general del PLA

A partir dels resultats obtinguts, es pot extreure un anàlisi de les propietats mecàniques del PLA imprès per FDM. Es fa palesa que esdevé un material molt resistent a compressió, independentment dels paràmetres de farciment, assolint-se una càrrega superior als 1960 N (200 kg). Alhora, també s'observa que no suporta bé els esforços a flexió, resistint com a màxim 394 N (35 kg). Les càrregues de tensió es troben entremig, assolint-se valor força elevats de fins a 1568 N (160 kg). Tanmateix, la residència mecànica es veu més alterada pel tipus de patró de farciment utilitzat que per la densitat del mateix.

f. Paràmetres de farciment òptims

Fins ara s'han analitzat totes les relacions entre els paràmetres de farciment i les variables avaluades. Així doncs, ja es pot determinar quins seran els paràmetres d'impressió que s'utilitzaran per a la fabricació de les peces del BAMC envers el seu reblliment.

- viii. **Densitat de farciment:** les sol·licitacions màximes que es poden donar durant la utilització del braç de mesura són molt inferiors a les cotes màximes de resistència obtingudes. Alhora, a major densitat de farciment, el consum de recursos (temps i material) augmenta substancialment. Per tant, una densitat de farciment del 20% resulta més que suficient. Tanmateix, per raons de seguretat, es podria assolir el 25%.
- ix. **Patró de farciment:** el patró de farciment ideal és, sense dubte, el giroide. La seva afectació en el temps d'impressió és mínima, però és la geometria que millors propietats mecàniques ofereix.

Propietats de farciment òptimes	
Densitat de farciment (%)	20-25%
Patró de farciment	Giroide

Taula 63. Selecció dels paràmetres de farciment òptims

- x. **Orientació de capes:** tot i que aquest paràmetre no s'ha analitzat per mitjà de l'assaig, resulta evident que una peça serà molt més resistent si les capes de material que la formen es distribueixen en relació al tipus majoritari d'esforç al que es sotmeten. La disposició geomètrica ha de ser relativa a l'acció que genera l'esforç de la següent forma:

Orientació de capes	
Tracció – compressió	Paral·lela
Flexió	Perpendicular
Torsió	Perpendicular
Tallant	Perpendicular

Taula 64. Relació orientació capa – direcció esforç

8.3. Assaig de fallada estàtica en l'articulació

La dificultat en el dimensionament de les peces fabricades per impressió tridimensional en FDM esdevé un punt conflictiu en el seu propi disseny. A fi de poder comprovar les prestacions i el comportament mecànic general de les articulacions del BAMC projectades, s'ha optat per realitzar un assaig de fallada estàtica. Aquest procés experimental ha de permetre situar un llindar orientatiu en relació a l'esforç màxim que les articulacions dissenyades poden suportar.

8.3.1. Objectius

L'assaig de fallada plantejat en aquest punt de la memòria busca donar a la manca d'informació que hi ha en relació al procés d'impressió per FDM a partir de materials polimèrics, sobretot en l'àmbit del comportament i la resistència mecànica. Ja s'ha vist en el procés de càlculs de dimensionament, que l'articulació del BAMC més sol·licitada i per tant, crítica, és la B. Tenint en compte tot això, aquests són els objectius principals que planteja donar resposta aquest procés experimental:

- Caracteritzar el comportament mecànic del conjunt de les peces impreses per FDM (amb PLA) que formen les articulacions del braç, sobretot la B, per mitjà d'un assaig de fallada estàtica.
- Aplicar esforços de tracció pura i esforços combinats per mitjà d'una excentricitat coneguda incrementant la càrrega fins assolir la fallada estructural de les peces.
- Determinar la secció/peça crítica del conjunt articular projectat.
- Determinar un valor llindar (màxim), d'esforços que l'articulació és capaç de suportar.
- Relacionar els resultats obtinguts amb els paràmetres d'impressió utilitzats i amb la bibliografia especialitzada consultada.

8.3.2. Planificació

L'assaig consisteix en, havent subjectat de forma ferma el conjunt de peces a assajar (subconjunt articular complet) a una superfície estable (bancada), anar aplicant una càrrega, en forma de pes, de valor conegut. Aquesta acció anirà augmentant de magnitud de forma controlada (1 kg per augment) i cada cert interval de temps constant (60 s). Passats uns augments de càrrega, el conjunt hauria de cedir per la secció d'alguna peça determinada, havent-se arribat al seu límit de resistència mecànica. Alhora, les càrregues sempre seran aplicades en la direcció per la que passa l'eix longitudinal del membre al que es troba unit el conjunt articular per la part teòricament superior (tub de PVC); per tant, s'utilitzaran els dos cargols passants entre la base doble SAP i la base doble simple com a punt d'ancoratge de la càrrega.

No s'han inclòs els encòders òptics ni cap altre element electrònic en el muntatge d'assaig.

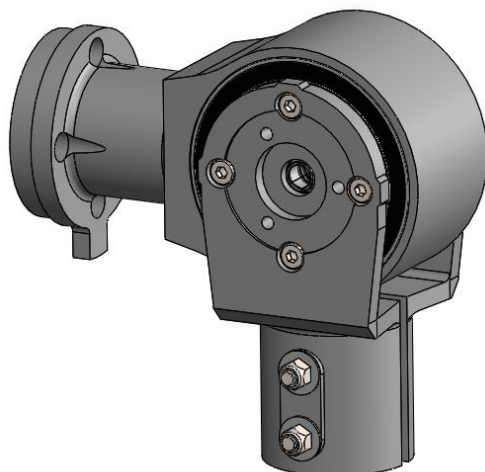
Per altra banda, es realitzaran dos assaigs alterns per a dos conjunts de peces iguals en els que la càrrega s'aplicarà en dues direccions diferenciades produint situacions tensionals diverses:

- Assaig A (tracció):** s'aplicarà amb tot el conjunt articular alineat en direcció perpendicular al sòl.
- Assaig B (càrrega amb excentricitat):** s'aplicarà amb una part del conjunt articular alineat en direcció paral·lela al sòl. Majoritàriament es tractarà d'un assaig a flexió.

8.3.2.1. Caracterització del conjunt articulat

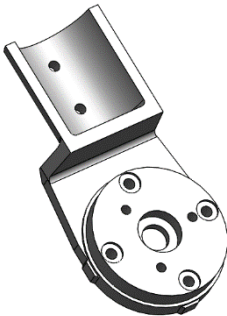
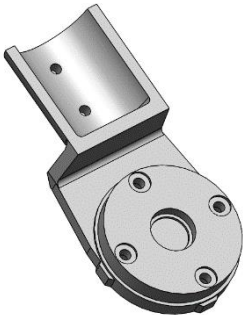
En aquest subapartat s'identifiquen i es caracteritzen les peces a les que s'aplicarà l'assaig de fallada estàtica a partir de la seva geometria i les condicions i els paràmetres d'impressió aplicats en la seva fabricació. Bàsicament el conjunt de prova es forma per totes les peces comunes presents en l'articulació perpendicular B.

Conjunt articulat



Especejament

Peces de fabricació pròpia

Denominació	Unitats	Material	Imatge
Tapa doble encóder	1	PLA	
Tapa doble simple	1	PLA	

Corona acoblament base	1	PLA	
Eix excèntric	1	PLA	
Disc cicloidal sup.	1	PLA	
Disc cicloidal inf.	1	PLA	
Passadors	4	6061 T4	
Elements normalitzats			
Denominació	Unitats	Imatge	
Cargol ISO 4762 – M4x50	4		
Cargol ISO 4762 – M4x45	4		
Volandera DIN 125 A – d4,3 (M4)	4		
Femella hexagonal DIN 934 – M4	4		

Femella autoblocant DIN 985 – M4	4	
Rodament 6810-2RS	2	
Rodament 688-2RS	2	
Rodament 6700-ZZ	2	

Taula 65. Peces de la unitat articular B

Per altra banda, totes les peces modelades en PLA per mitjà d'impressió 3D han estat fabricades amb els següents paràmetres d'impressió:

Paràmetres bàsics d'impressió	
Altura de capa	0,16 mm
Gruix parets	1,2 mm
Recompte línies de paret	2
Gruix inf./sup.	0,84 mm
Capes sup./inf.	3
Temperatura del fusor	220°C
Temperatura de la plataforma	60°C
Flux	98%
Velocitat d'impressió	40,0 mm/s
Rebliment (<i>Infill</i>)	20% (40% eix) (25% corona)
Patró de rebliment	Giroide

Taula 66. Paràmetres d'impressió aplicats

8.3.3. Muntatge experimental

Els muntatges experimentals utilitzats per a cadascun dels dos assaigs o tipus de càrrega aplicada es troben representats en les figures recollides en la taula adjunta.

Muntatge experimental Assaig A



Muntatge experimental Assaig B



Taula 66. Paràmetres d'impressió aplicats

8.3.4. Resultats

Els resultats obtinguts per a cadascun dels dos assaigs realitzats així com un breu guió de seguiment es recullen en les taules adjuntades.

8.3.4.1. Assaig A

Desenvolupament Assaig A (tracció)

Càrrega	Observacions
...	...
49,05 N (5 kg)	Es fa visible una certa separació del conjunt en la unió del rodament entre la corona – base sup. i la corona tubular
...	...

156,96 N (16 kg)	La separació anterior augmenta notablement
...	...
206,01 N (21 kg)	Fallada en la base doble simple; es desmunta l'articulació

Taula 68. Desenvolupament Assaig A

Resultats Assaig A (tracció)	
Càrrega de fallada Per a quina massa aplicada ha fallat l'articulació?	206,01 N (21 kg)
Peça limitant Quina ha estat la peça del conjunt que ha fallat?	Tapa doble simple
Secció/zona fallada En quina zona de la peça s'ha donat la fallada?	Cavitat femella
Direcció capes FDM Quina és la direcció de deposició de les capes de la zona o secció de fallada respecte la d'aplicació de la càrrega?	Perpendicular
Tipus de fractura La peça ha experimentat alguna mena de deformació? Quin aspecte presenta la secció de fallada?	Fractura dúctil i múltiple, amb deformació plàstica prèvia i diversos flancs de separació a diferents nivells de capes d'impressió
Afectació mobilitat La fallada afecta a la mobilitat de l'articulació?	Mobilitat impedida
Manteniment estructural Tot i la fallada, l'articulació és capaç de mantenir l'estabilitat estructural?	No, fallada estructural
Observacions	-

Taula 69. Resultats Assaig A

8.3.4.2. Assaig B

Desenvolupament Assaig B (càrrega amb excentricitat)	
Càrrega	Observacions
...	...
39,24 N (4 kg)	Es fa apreciable la deflexió del conjunt en la unió del rodament entre la corona – base sup. i la corona tubular
...	...
98,1 N (10 kg)	La deflexió anterior es magnifica notablement
...	...
156,96 N (16 kg)	Fallada en la corona acoblament base

Taula 70. Desenvolupament Assaig B

Resultats Assaig B (càrrega amb excentricitat)	
Càrrega de fallada Per a quina massa aplicada ha fallat l'articulació?	156,96 N (16 kg)
Peça limitant Quina ha estat la peça del conjunt que ha fallat?	Corona acoblament base
Secció/zona fallada En quina zona de la peça s'ha donat la fallada?	Cavitat cabota cargol
Direcció capes FDM Quina és la direcció de deposició de les capes de la zona o secció de fallada respecte la d'aplicació de la càrrega?	Paral·lela
Tipus de fractura La peça ha experimentat alguna mena de deformació? Quin aspecte presenta la secció de fallada?	Fractura fràgil, neta i única, sense deformació prèvia i donada per separació entre dues capes d'impressió
Afectació mobilitat	Mobilitat impedida

La fallada afecta a la mobilitat de l'articulació?	
Manteniment estructural Tot i la fallada, l'articulació és capaç de mantenir l'estabilitat estructural?	No, fallada estructural
Observacions	El conjunt ja mostra tendència a separar-se a causa de la flexió amb càrregues relativament baixes (39, 24N (4 kg))

Taula 71. Resultats Assaig A

8.3.5. Conclusions

A partir dels resultats obtinguts d'ambdós assaigs, s'ha arribat a les següents conclusions envers el comportament mecànic de les articulacions cicloïdals del braç:

- f. **Resistència articular a tracció:** en l'assaig A, en el que s'avalua el conjunt articular sota una càrrega a tracció pura, es fa palesa que la resistència de l'articulació és força gran per aquest tipus de sol·licitació. Una càrrega màxima de 206,01 N (21 kg) és molt superior a qualsevol de les possibles càrregues que s'aplicaran sobre el BAMC i les seves articulacions durant el funcionament del mateix. Així doncs, es pot arribar a afirmar que les articulacions es troben sobredimensionades en aquest àmbit i que no s'arribarà a la fallada general en l'articulació a causa de la tracció.
- g. **Resistència articular a flexió:** a partir de l'assaig B, en el que s'aplica una càrrega amb excentricitat i els esforços majoritaris esdevenen de flexió, sobretot en la corona acoblament tubular, també s'obté informació valuosa. Les magnituds admissibles de càrrega són força menors en comparació amb l'assaig anterior, amb una cota màxima de 156,96 N (16 kg). Tanmateix, segueix essent un valor molt més elevat dels que s'aplicaran sobre el braç en la realitat. També s'ha observat que, la disposició de les capes de material en paral·lel amb l'acció causant de la flexió resulta un punt debilitant molt diferencial.
- h. **Resistència mecànica general:** per altra banda, ja s'ha vist en l'apartat de càlculs de dimensionament que, precisament, l'articulació més sol·licitada del BAMC és la B. Així doncs, a partir dels assaigs es pot deduir un comportament mecànic general satisfactori de les unitats cicloïdals articulars. Aquestes són capaces de suportar esforços molt superiors als que s'aplicaran en la realitat. Amb això, donat que l'articulació assajada és la més sol·licitada en una situació d'ús real, els resultats es poden extrapolar a totes les altres articulacions. Alhora, les parts reforçades amb una major densitat de farciment, com l'eix excèntric, en cap cas s'han vist malmeses el que assegura un correcte dimensionament, com a mínim.
- i. **Mancances i limitacions de l'assaig:** en els dos assaigs realitzats, es fa palesa la limitació en la seva validesa envers el comportament mecànic real de les articulacions del BAMC. Tanmateix, tot i exposar-se situacions arbitràries molt guiades i específiques, l'experimentació permet donar una idea general de l'estabilitat i la resistència de les unitats articulars. Alhora, aquest procés ha permès determinar dues cotes o l·lindars de càrregues màximes que poden servir com a valors de referència o comparació en procés de càlcul i dimensionament.

8.4. Determinació del parell resistent articular

Per a l'elaboració de càlculs de dimensionament dels elements mecànics del BAMC, es parteix d'una situació d'ús específica; d'aquesta se'n deriven les sol·licitacions que serveixen de base per al procediment de càlcul. Tanmateix, per conformar la situació d'ús, es necessita el valor del parell resistent articular. És a dir, el moment que s'ha d'aplicar en les articulacions del braç de mesura per modificar-ne la posició angular relativa dels membres cinemàtics que uneix. Concretament, es requereix el moment resistent de les articulacions basades en un mecanisme cicloidal amb eix de rotació perpendicular als segments que uneix (articulacions B i C). En aquest assaig es desenvolupa un procediment experimental senzill que permet analitzar aquesta dada.

8.4.1. Objectius i planificació

L'objectiu d'aquest assaig és força concret:

- Determinar el valor del parell resistent en les articulacions B i C del BAMC.

Per materialitzar aquest objectiu, s'ha desenvolupat una metodologia senzilla i intuïtiva que permet obtenir el valor buscat, de forma aproximada, molt fàcilment. Cada unitat articular cicloidal és, en realitat, un parell de revolució que uneix dos membres cinemàtics o segments del braç de mesura. Així doncs, el procediment es basa en, havent aïllat l'articulació construïda, incloent l'encòder i la resta d'elements, fixar un dels segments sobre una superfície que permeti mesurar càrregues (bàscula). Sobre l'altra segment s'anirà aplicant pressió fins que s'acciioni el moviment angular, mesurant la força en que això es dona. Coneixent les distàncies exactes d'aquests segments es pot calcular el moment resistent de l'articulació. Cal tenir en compte que l'articulació en sí s'ha de recolzar sobre una superfície diferent per evitar que el seu propi pes o la variació de posició dels centres de gravetat dels elements que la formen afectin a les lectures.

Concretament, s'utilitzarà l'articulació C per aquesta mesura. La seva conformació permet annexar segments tubulars de PVC a banda i banda, i les cares planes faciliten a la subjecció de la unitat articular. Tanmateix, a causa del disseny projectat, totes les articulacions cicloidals compten amb elements idèntics i una construcció homogènia. Per tant, el moment resistent serà el mateix en les articulacions A, B i C.

Per assegurar una correcta aproximació al valor real en els resultats, es realitzaran 6 mesures des de diferents angles d'obertura articular envers la superfície de recolzament (15°, 30°, 45°, 60°, 75° i 90°) i se n'obtindrà la mitjana.

8.4.2. Resultats

Els resultats obtinguts es recullen en la següent taula (*Taula 72*):

Determinació del moment resistent articular			
Angle articular inicial (°)	Massa resultant (g)	Càrrega resultant (N)	Moment resistent (Nm)
15	65	0,637	0,319
30	64	0,627	0,314
45	69	0,676	0,338
60	67	0,657	0,329
75	65	0,637	0,319
90	64	0,627	0,314
Mitjana	65,667	0,644	0,322

Taula 72. Càlculs i resultats de l'assaig

8.4.3. Conclusions

A partir d'aquest senzill assaig, es poden treure una sèrie de conclusions concises, però de gran utilitat per a desenvolupar el procés de càlcul i dimensionament de certs components mecànics del BAMC.

a. Moment resistent

El moment resistent mitjà de les articulacions B i C s'ha determinat en 0,322 Nm. És a dir, cal transmetre al centre d'aquestes articulacions un parell de 0,322 Nm abans de poder començar a moure els segments tubulars que uneix. Es tracta d'un moment de magnituds molt petites, gairebé menyspreable en termes de dimensionament mecànic.

b. Exactitud de la mesura

Com s'ha pogut observar en les dades obtingudes, la precisió de la mesura no és molt elevada. Tanmateix, la seva variabilitat no diversifica molt, pel que esdevé una bona aproximació al valor del moment resistent de les articulacions cicloïdals.

8.5. Assaig computacional estàtic en l'estructura tubular

De l'estructura tubular en PVC comercial projectada no preocupa tant el fet de la fallada estàtica, donat que el PVC és un polímer molt resistent amb una resistència mecànica elevada; així mateix, l'estructura no esdevé un punt conflictiu de concentració de tensions en la cadena cinemàtica que formen els diferents components del BAMC. El que sí té un especial interès és la possible deformació elàstica que pugui patir a causa de les sol·licitacions generades pel pes dels mateixos elements i peces i per les accions de l'usuari durant la utilització. Una tendència a la flexió desmesurada, per exemple, podria generar continues lectures errònies o poc acurades dels encòders i conseqüents mesures de baixa precisió.

Contràriament als assaigs enfocats a peces fabricades per mitjà de la impressió tridimensional per FDM, els tubs de PVC empleats sí són objectes sòlids i massissos, fabricats per extrusió. Per tant, el seu comportament tendeix al descrit per les teories clàssiques tensionals. Per això, el Mètode dels Elements Finites (MEF) és capaç de replicar-ne el comportament mecànic molt fidelment. Així doncs, utilitzant part de la tasca desenvolupada en els assaigs previs (centres de gravetat, masses de les peces, etc.), es un assaig computacional estàtic de d'esforços, replicant condicions d'ús reals.

8.5.1. Objectius

El present assaig es centrarà en el segment tubular comprés entre les articulacions B i C, el de major longitud (519 mm); també és el segment de tub que més orificis té en la seva superfície per possibilitar el pas del cablejat del circuit electrònic del BAMC. Per altra banda, degut a la seva posició, és el segment que suporta més i majors sol·licitacions i el que, per tant, té una major tendència a la deformació. Amb tot això, els objectius de l'assaig queden clars:

- Analitzar de forma computacional el comportament del segment tubular (PVC) B-C i les deformacions experimentades per mitjà del MEF.
- Definir i traduir les condicions d'ús i sol·licitacions del BAMC reals aplicades sobre el segment analitzat per aplicar-les de forma simplificada.

8.5.2. Planificació i hipòtesis

Donat que l'experimentació es realitza per mitjà del MEF, s'utilitzarà el software CAD usat per al modelatge del braç de mesura per aplicar-lo (*SolidWorks*). Així doncs, es partirà del model computacional en 3D que es té pel BAMC. A partir d'aquest, assignant les propietats físiques i mecàniques als diferents components que el formen, es podran designar també els centres de massa. La determinació posicional d'aquests servirà per traslladar totes les components de pes, de cadascun dels elements del braç, fins a l'extrem del segment tubular B-C. D'aquesta forma es podrà simplificar el modelatge, eliminant els elements perifèrics, per aplicar el MEF només al cos del tub.

Per altra banda, es partirà del les següents hipòtesis o suposicions:

- El càlcul tensional es realitza suposant que el BAMC es troba totalment estirat i en posició horitzontal.
- Només es tenen en compte les accions provocades per les masses (pes) dels elements que formen el braç.
- S'analitzaran totes les tipologies d'esforços alhora (flexió, tallant, torsió, compressió i tracció) que, de fet, s'experimenten en l'articulació B del braç de mesura.
- Només es tenen en compte les accions produïdes pels elements situats més enllà de l'articulació C, aquesta inclosa, cap al SAP o palpador.
- L'extrem del segment tubular de PVC fixat a l'articulació B es representarà fixat a la bancada, per mitjà de les unions de cargol pertinents.
- Tots els càlculs es basen en un SR paral·lel al de la figura (*Fig. 63*) amb origen en el centre geomètric de la superfície inferior de la base del BAMC.
- El sentit físic de gir dels moments es determinarà per la regla de la mà dreta o del tornavis.

Aquestes simplificacions permeten eliminar les accions derivades de la base i els components localitzats entre aquesta i l'articulació B, com si la bancada les absorbís. Alhora, la situació presentada representa un cas extrem, en el que tots els elements posteriors a l'articulació C generen el màxim moment sobre el segment tubular B-C amb el seu pes. Per tant, servirà per comprovar una cota màxima de la flexió del tub.

8.5.3. Càlculs previs

El modelatge de la situació assajada per mitjà del MEF, parteix de la configuració posicional del BAMC recollida en la figura adjunta.

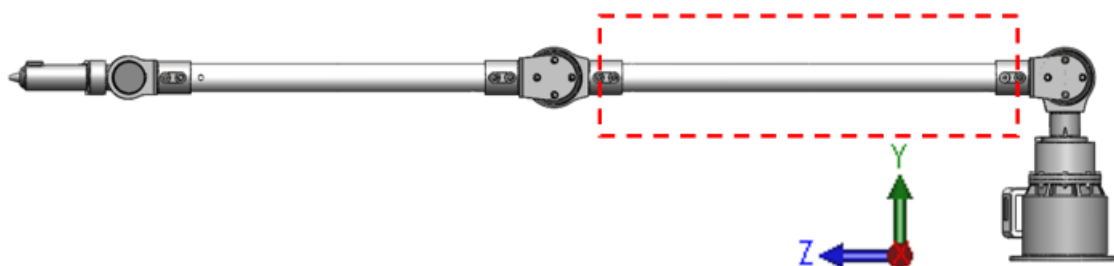
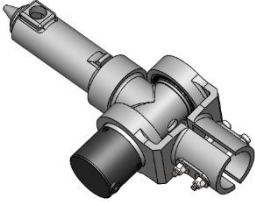
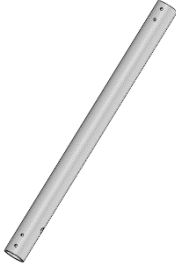
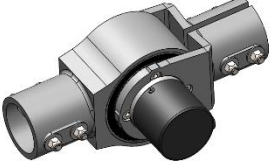


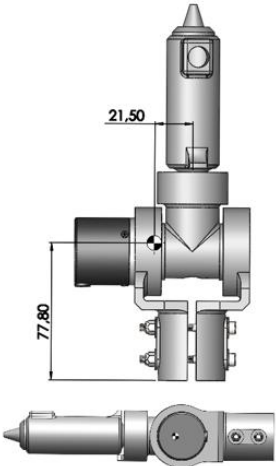
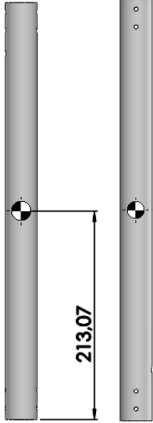
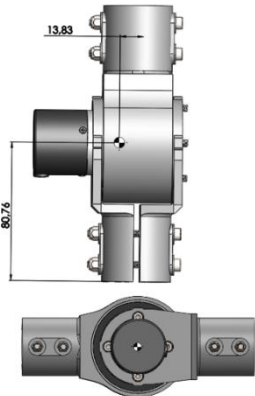
Fig. 63 Situació aplicada en l'assaig per MEF

Coneixent el material (densitat) que forma cadascun dels elements del BAMC, es pot determinar la posició espacial dels respectius centre de gravetat per mitjà del programari *SolidWorks*.

Caracterització subconjunts			
Subconjunt	Element	Unitats (unt.)	Massa total (g)
Articulacions D i E			578,55
	Cos SAP	1	156,2
	Eix SAP	1	88,3
	Tapa SAP simple	1	42,4
	Tapa SAP encóder	1	47,3
	Palpador	1	0,75
	Encóder	1	140
	Polsador	1	5
	Rod. Eix SAP	2	50
	Rod. SAP	1	29
	Segei int.	1	3
	Segei ext.	1	1
	Volandera M4	4	2
	Cargol DIN 912 M4x45	2	12
	Femella autoblocant M4	2	1,6
Tub PVC (seg. C – D)			147,7
	Tub PVC	1	147,7
Articulació C			574,9
	Tapa doble encóder	1	53,1
	Tapa doble simple	1	57,2
	Disc cicloidal inf.	1	23,9
	Disc cicloidal sup.	1	23,9
	Passador	4	6,4
	Corona acoblament tubular	1	94,8
	Encóder	1	140
	Rodament corona	2	106
	Rodament eix	2	12
	Rodament disc	2	4
	Volandera M4	8	4
	Cargol DIN 912 M4x45	4	20
	Femella autoblocant M4	4	3,2
	Femella hexagonal M4	4	2,4
Cargol DIN 912 M4x50	4	24	

Taula 73. Caracterització dels conjunts de masses considerats

A partir de les dades anterior, es poden calcular els parells en l'extrem de segment tubular B – C, causat pel trasllat de les accions (pes) generades pels conjunts modulars analitzats anteriorment. Els resultats obtinguts es recullen en la següent taula (Taula 74):

Trasllat d'accions				
Subconjunt	Centre de masses (mm)	Massa total (g)	Pes (N)	Moments generat (Nm)
Articulacions D i E 	$G(g_x, g_y, g_z)$ $= (21,5; 214; 1105,06)$	578,55	5,676	$M_x = +3,092$ $M_y = 0$ $M_z = -0,122$
Tub PVC (seg. C – D) 	$G(g_x, g_y, g_z)$ $= (0; 214; 854,07)$	147,7	1,449	$M_x = +0,426$ $M_y = 0$ $M_z = 0$
Articulació C 	$G(g_x, g_y, g_z)$ $= (13,83; 214; 600,76)$	574,9	5,640	$M_x = +0,230$ $M_y = 0$ $M_z = +0,078$

Taula 74. Centres de massa i accions de cada conjunt de masses considerat

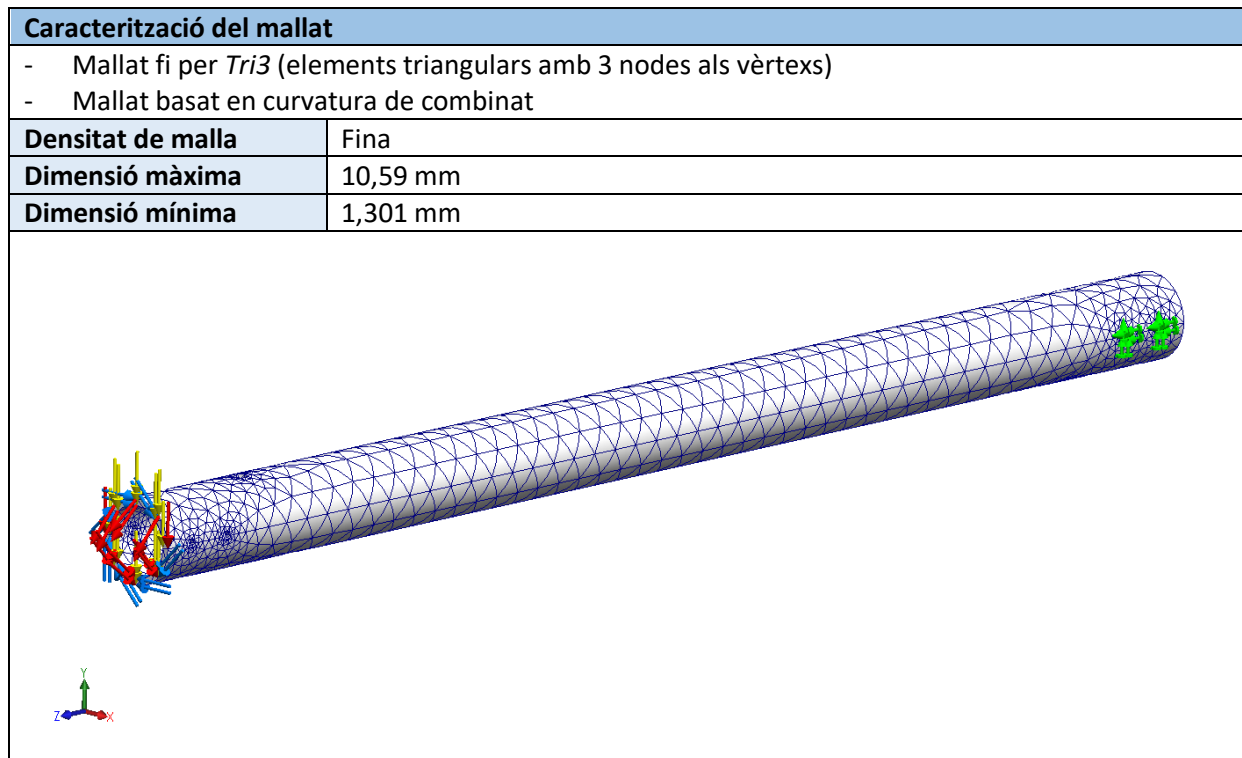
8.5.4. Aplicació del Mètode dels Elements Finitos

Per aplicar el MEF per mitjà del software *SolidWorks*, cal definir una sèrie de condicions de contorn, a banda d'incloure les accions (moments i forces) calculades anteriorment. A partir de les següents imatges i taules es determinen les components i les restriccions introduïdes.

Modelització per MEF	
Accions i càrregues externes	Condicions de contorn
$P = -12,765 \text{ N}$	Extrem B fixat pels orificis de subjecció
$M_x = +3,748 \text{ Nm}$	
$M_z = -0,044 \text{ Nm}$	

Taula 75. Accions aplicades en la simulació per MEF

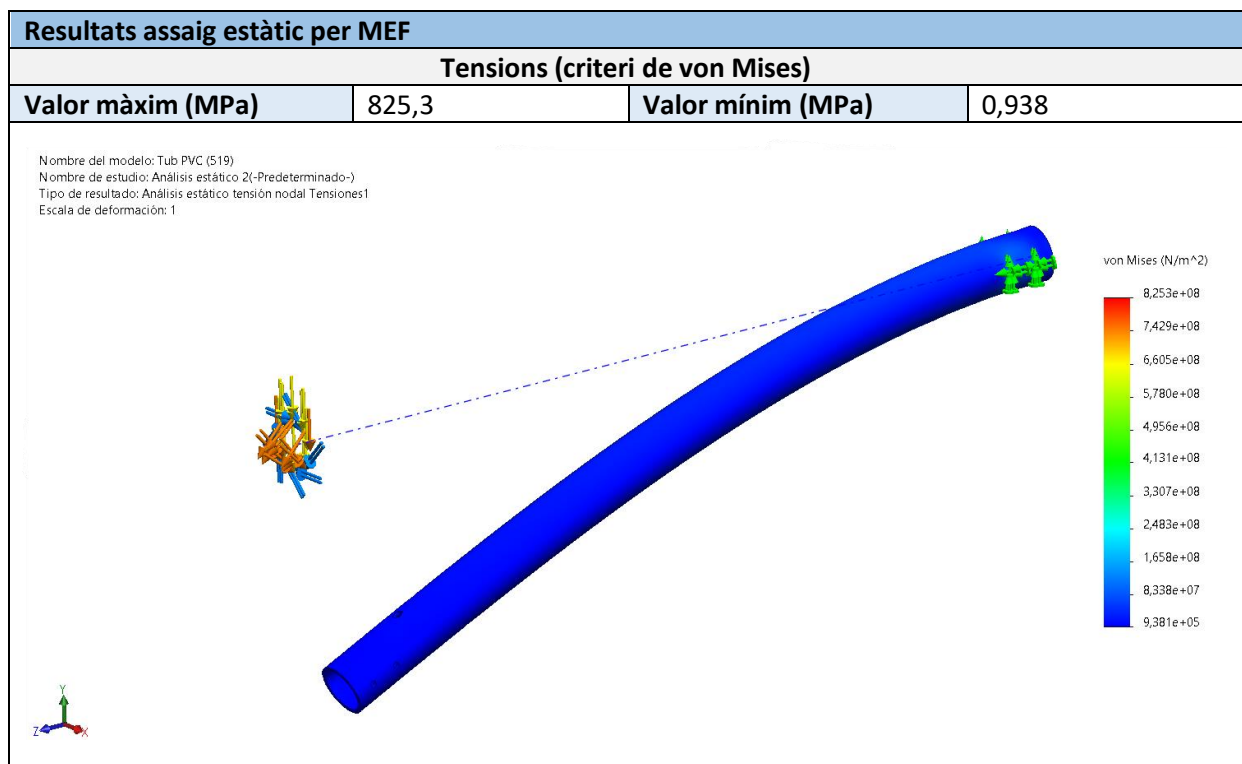
El MEF es basa en la generació d'una malla que fragmenta en petites regions anomenades elements, triangulars en aquest cas, la totalitat del cos modelat. Aquestes zones, unides entre elles per punts anomenats nodes, poden situar-se només en els extrems dels elements delimitats, o en els extrems i en les arestes. En aquest cas, donat que s'han utilitzat elements triangulars *Tri3* (amb 3 nodes), només es trobaran als vèrtexs. Així doncs, a partir de l'aplicació de les corresponents lleis i equacions diferencials que relacionen les tensions amb el desplaçament, en funció de la rigidesa (que depèn del Mòdul de Young del material), i aplicant unes certes condicions de contorn, s'obtidran valors de tensions i desplaçaments per a cada node. Aquests valors es poden interpolar linealment per acabar obtenint els valors per a qualsevol punt del cos.

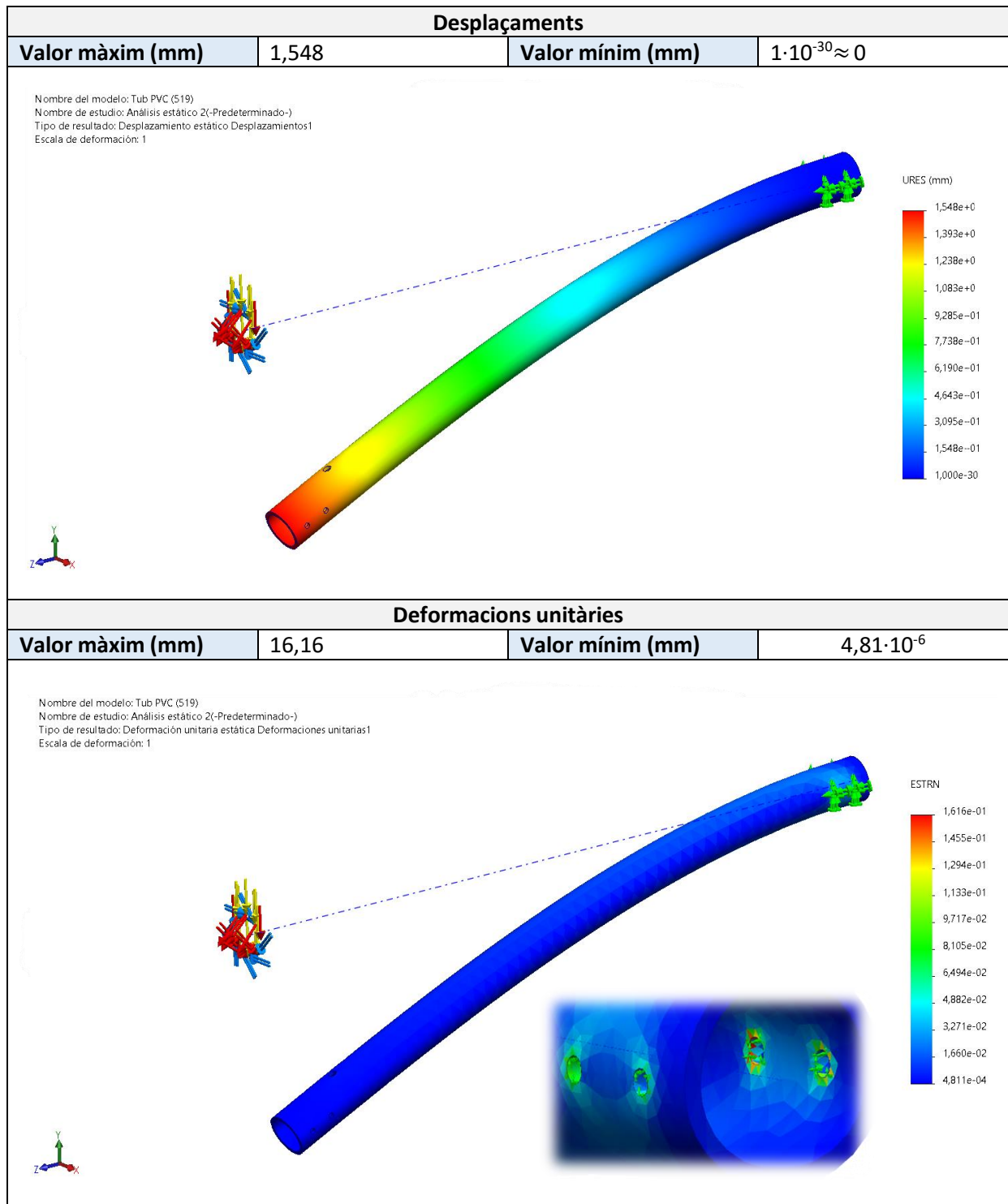


Taula 76. Caracterització del mallat d'anàlisi amb elements triangulars (*Tri3*)

8.5.5. Resultats

Els resultats de la simulació de comportament mecànic per MEF obtinguts es classifiquen en funció de la seva naturalesa. En total s'han obtingut dades en 3 direccions diferenciades: tensions (von Mises), desplaçaments (deformacions reals) i deformacions unitàries. Els valors i la representació gràfica de totes elles es recullen en la taula adjunta.





Taula 77. Resultats del l'assaig per MEF

8.5.6. Conclusions

A partir dels resultats obtinguts, observats en l'anterior apartat, es poden extreure les següents conclusions:

a. Deformació màxima

La deformació (desplaçament) màxima prevista de l'extrem del segment tubular de PVC situat entre les articulacions B i C és de 1,548 mm. Òbviament, es situa en l'extrem C, el més llunyà del que s'ha considerat com a punt de fixació. Aquest valor, tot i que és mínim en comparació amb la longitud del tub (519 mm), en termes de precisió en la mesura del BAMC adquireix un pes important.

b. Tensions màximes

En tremes tensionals, la tensió màxima assolida ronda els 825,3 MPa, i es situa en un dels orificis de subjecció de l'extrem B, fixat a bancada per a la simulació. És a dir, es situa en una de les possiblement considerades com seccions crítiques. Tenint en compte que el Mòdul de Young o d'Elasticitat del PVC genèric es situa entorn els 2140 i 4140 MPa (2,14 – 4,14 GPa), les tensions màximes no s'hi acosten ni a la meitat. Per tant, totes les deformacions experimentades són de caire elàstic (no permanent) i el tub tornaria al seu estat inicial un cop es deixessin d'aplicar les accions avaluades.

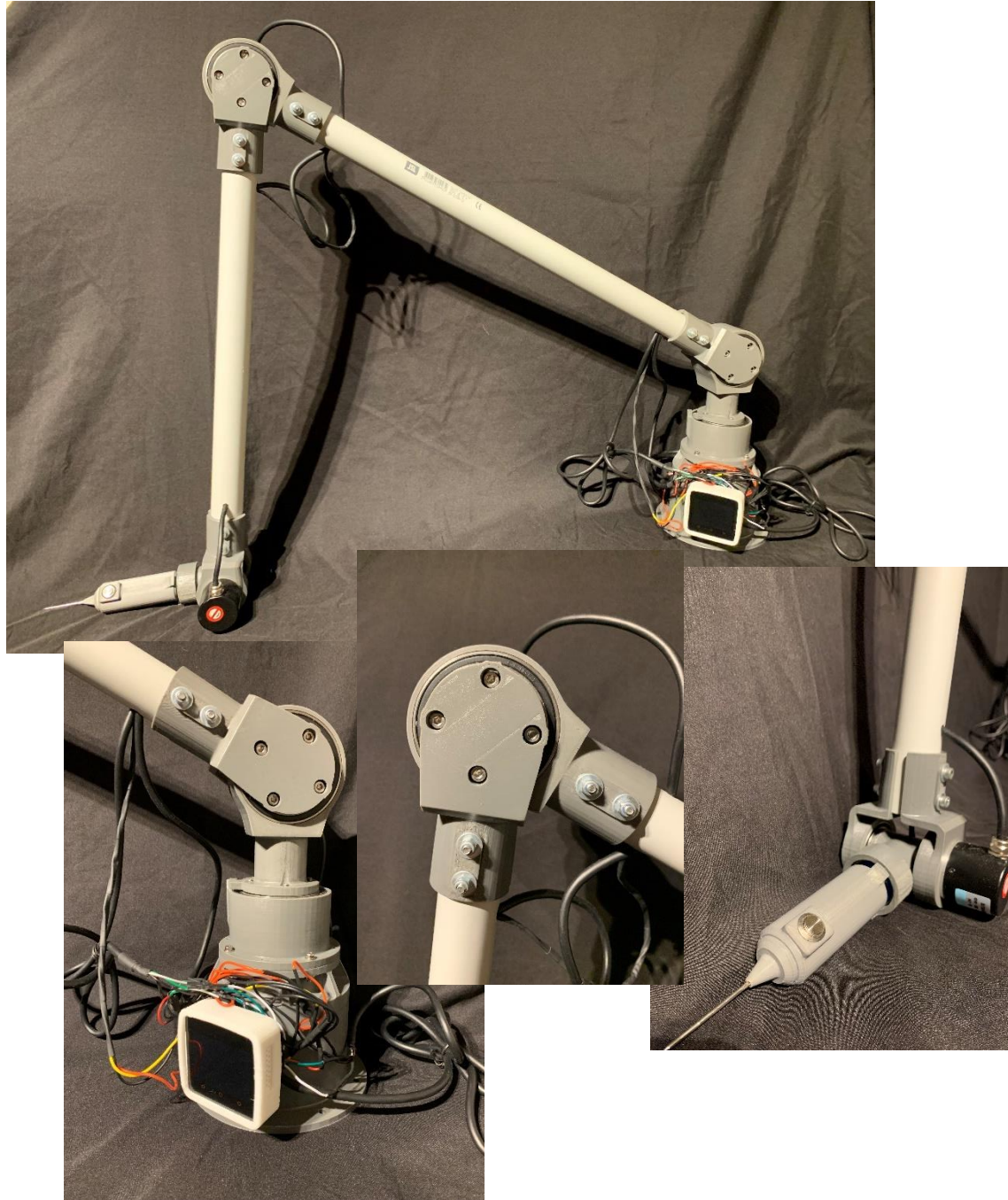
c. Aplicabilitat

Tanmateix, la situació d'ús presentada per a aquest assaig és un cas extrem que difícilment es dona en la realitat a l'hora de realitzar mesures amb el BAMC. Per altra banda, no s'ha tingut en compte l'acció de l'usuari que subjecta el braç pel manipulador o SAP i en mantén la posició. L'operador actuaria com una segona bancada absorbint o contrarestant la major part d'aquests esforços. Per tant doncs, es pot concloure que les deformacions derivades de les accions de la resta d'elements que formen el braç no són suficientment grans com per causar problemes d'exactitud en la mesura.

9. Resultats del projecte

Seguint la totalitat dels procediments i de la informació tècnica continguda en la present memòria, s'ha arribat a la construcció completa d'un prototip de BAMC a escala real (1:1) i totalment funcional. Les següents figures recullen els resultats obtinguts.

Resultat global del projecte



Taula 78. Registre gràfic de la construcció del prototip de BAMC projectat

Per altra banda, els resultats obtinguts s'han analitzat des de diferents punts de vista o a través de diversos àmbits, per una lectura més detallada:

a. Fabricació

Tots els components estructurals i funcionals (mecànics) que conformen el prototip de BAMC s'han dissenyat, dimensionat i fabricat durant el projecte. També s'han incorporat al disseny els respectius elements normalitzats necessaris (cargols, rodaments, volanderes de de seguretat, etc.). La major part de les peces s'han fabricat per mitjà d'impressió 3D (FDM) ajustat correctament els paràmetres d'impressió en base a processos experimentals. El material polimèric d'impressió és el PLA. També s'han efectuat processos de mecanitzat per arrencament d'encenalls (en PVC i alumini) tals com el tornejat. La part estructural es forma per segments tubulars de PVC comercial. La totalitat del prototip presenta un aspecte ferm i sòlid, la mobilitat és òptima i resulta fàcil de manejar. El BAMC resisteix les sol·licitacions donades durant el seu ús en un procés de mesura sense aparició de ruptures o fallades per fatiga.

Visualment, el prototip presenta un aspecte compacte, industrial i senzill; la part estètica no s'ha treballat en gran mesura.

b. Muntatge

Les diferents peces amb moviment relatiu entre sí funcionen tal i com s'havia projectat, i els moviments articulars són més o menys suaus. L'estructura tubular permet el pas del circuit electrònic de funcionament a través seu, quedant cobert i protegit en la major part del braç. Els diferents components comercials mecànics o estructurals (rodaments, cargols, etc.) i els electrònics (encòders, polsador del SAP) s'acoblen a la perfecció amb les peces fabricades, tal i com s'havia projectat. Tanmateix, en diversos punts del prototip hi ha un joc excessiu entre peces mòbils a causa de les toleràncies de fabricació. Les unitats articulars esdevenen punts especialment conflictius.

c. Circuit electrònic i software

El circuit electrònic resultant funciona correctament i relaciona els diferents elements perifèrics amb el microcontrolador central, permeten la comunicació i coordinació de les seves tasques en executar el software de mesura generat. Pel que fa a aquest últim, s'ha construït un programari de mesura complet, des de zero, a través de l'entorn de programació d'*Arduino*. Aquest conforma una interfície d'interacció entre l'usuari i l'aparell de mesura que permet controlar, seleccionar i efectuar el procés de mesura adient per obtenir les dades geomètriques desitjades.

Pel que fa al propi procediment de mesura, s'han projectat 4 variants diferents. Dues serveixen per recaptar posicions (coordenades) de punts, utilitzant un sistema de referència global o un de diferent, respectivament. Les altres dues s'enfoquen a obtenir distàncies, totals o descompostes segons els eixos del sistema de referència, entre punts diferenciats.

Els software també possibilita l'obtenció d'un fitxer en format text en la targeta microSD que recull, en forma de matriu de dades, les coordenades relatives o les distàncies mesurades amb el braç.

d. Funcionalitat

La funcionalitat del prototip de BAMC es veu compromesa pels processos de fabricació i disseny adoptats i les toleràncies de fabricació dels mateixos. El joc entre parts mòbils i les pròpies unitats articulars, basades en un mecanisme cicloidal multiplicador, provoquen relacions de transmissió inconsistentes que es tradueixen en lectures dels encòders errònies. Això provoca que la precisió de mesura disti molt de l'objectiu ($\pm 0,1$ mm).

e. Experimentació

A través dels processos experimentals i els assaigs d'esforços a les peces s'han pogut determinar diversos límits de resistència. S'han establert límits de resistència mecànica per esforços de tracció, tallant i flexió en peces fabricades en PLA per FDM, relacionant-los amb els paràmetres d'impressió. També s'ha comprovat la resistència mecànica de conjunts muntats, com les unitats articulars cicloïdals. Aquests valors han permès el correcte dimensionament, a través de càlculs i teories tensionals, de certs components mecànics del BAMC.

10. Conclusions del projecte

Un cop visualitzat el gruix del projecte recollit en la present memòria, es poden assolir multitud de conclusions envers el procés de disseny i fabricació d'un braç de mesura tridimensional per coordenades. En aquest apartat s'analitzarà la tasca d'enginyeria desenvolupada des de diverses vessants aplicant sempre un filtre d'objectivitat.

En línies generals, es pot afirmar que el projecte obtingut resulta una unitat completa i autosuficient; conté tota la informació i documentació tècnica considerada oportuna per il·lustrar el procés de disseny, fabricació i muntatge d'un BAMC. Seguint la metodologia de gestió de projectes industrials *PREDICA*, s'han tractat amb detall les principals àrees d'interès. La totalitat del projecte s'inicia a partir d'una necessitat d'un instrument de mesura per mesurar les posicions relatives de punts distanciats en objectes de grans dimensions, com pugui ser el xassís d'una motocicleta. En estadis inicials, s'ha fet ús de l'Enginyeria d'Estratègia, indagant en el camp tecnològic de la metrologia, en l'estat de l'Art i en el mercat dels BAMC. També s'han estudiat possibles processos de fabricació com la impressió 3D o el mecanitzat. A partir de l'Enginyeria de Concepte s'ha pogut definir el què i el com; partint d'una sèrie d'esbossos inicials, s'ha definit el model de BAMC, basat en unitats articulars cicloïdals i en lectures angulars per encòder òptics. Aquest s'ha modelat en format tridimensional per mitjà d'un software professional de modelatge 3D. Partint d'aquest model inicial s'ha pogut passar a l'Enginyeria de Detall, definint les peculiaritats del disseny, seleccionant components funcionals, programant el software de mesura, etc. Això ha permès passar a l'Enginyeria d'Execució, on s'han elaborat els planells i tota la documentació tècnica necessària per a la materialització del prototip de BAMC. Des d'aquí s'ha pogut enfocar el projecte des de la mira de l'Enginyeria de Fabricació, determinant paràmetres i executant els procediments propis de la impressió per FDM, sobretot. Paral·lelament, a tot això, s'ha anat donat un procés iteratiu de càlcul i experimentació pel que s'han anat corregint les mancances inicials de disseny i a través dels que s'ha assegurat el correcte dimensionament dels elements mecànics. Tot això ha donat com a resultat un prototip de BAMC a escala real i funcional en termes d'execució del software de mesura.

a. Objectius del projecte

Recordant els objectius plantejats a l'inici de la memòria, s'han assolit amb èxit gairebé tots ells. Com s'acaba d'exposar, s'ha elaborat satisfactòriament un procediment complet de disseny, dimensionament i fabricació dels elements que formen l'aparell seguint la metodologia de gestió de projectes *PREDICA* i cadascuna de les seves fases.

L'objectiu complert més tangible i notable és la pròpia obtenció d'un prototip de màquina funcional de mesura tridimensional per coordenades de tipologia de braç articulat (BAMC) amb possible aplicabilitat industrial. També s'ha portat a terme, doncs, la construcció i manufactura dels elements funcionals i les peces necessàries per al funcionament del prototip sense la intervenció d'agents fabricants externs, més enllà dels proveïdors de components comercials i normalitzats. Això ha possibilitat construir l'aparell sota una condicions de costos similars o inferiors a les ofertes en el mercat sense comprometre'n el funcionament i la precisió. Concretament, aquest fet s'evidencia a través dels pressuposts elaborats.

Per altra banda, s'ha elaborat un recurs documental que conté el recolzament i contrastació de totes les decisions preses durant el desenvolupament del projecte amb la informació i/o documentació suficient. Així doncs, s'ha donat també l'obtenció de la documentació tècnica (plànols, plec de condicions, etc.) necessària per a la reproductibilitat del prototip funcional obtingut. Tot això s'ha realitzat assegurant l'annexió i el compliment de les normatives específiques vigents del sector de les màquines de mesura i la metrologia en termes de disseny i funcionament, en la mesura que el projecte ho ha permès.

b. Precisió del prototip de BAMC

Malauradament però, tot i que el prototip de BAMC construït és funcional, pren les posicions de punts i genera fitxers de dades que s'emmagatzemen en la targeta microSD, la precisió assolida s'allunya molt de la fixada inicialment ($\pm 0,1$ mm). En aquest sentit, una de les principals mancances del projecte és la falta d'una metodologia definida per comprovar la precisió del prototip. Aquesta manca de precisió en la mesura pot venir donada per molts factors. Potser el més determinant d'aquests sigui el procés de fabricació majoritari, la impressió tridimensional per FDM. La major part de components del braç s'han fabricat per mitjà d'una impressora domèstica, de baix cost, i compta amb una precisió màxima de $\pm 0,1$ mm. Per obtenir precisions en la mesura similars, la tolerància de fabricació hauria de ser controlable, mesurable i inferior al llindar de precisió. Els esforços enfocats al correcte calibratge de la impressora 3D usada no han estat suficients. Igualment, la problemàtica en la fabricació ha pogut influir en el funcionament dels components mecànics projectats i en la interacció entre ells. Cal fixar-se especialment en el cas dels mecanismes cicloïdals, element central de les unitats articulars en les que es basa la funcionalitat del BAMC; és molt probable que la relació de transmissió que mostrin aquests mecanismes coaxials no sigui constant ni homogènia entre les articulacions a causa de les toleràncies de fabricació. Això es tradueix directament en una mala lectura en els encòders del desplaçament angular dels segments del braç de mesura.

En definitiva, la recerca de l'optimització o reducció màxima en els costos materials i de fabricació impliquen necessàriament el detriment d'aspectes funcionals, com la precisió. A banda de la rendibilitat, hi ha un motiu de pes rere el per què els instruments de mesura industrials tenen costos tan elevats; a majors prestacions i nivell tecnològic, més recursos es consumeixen en el procés de desenvolupament.

c. Aparició de dificultats

A banda de la precisió del BAMC, en el desenvolupament del projecte s'han donat dificultats significatives que s'han hagut de resoldre. Entre elles, la principal ha estat la selecció i el desenvolupament d'un disseny articular que permetés un augment de la resolució de mesura dels encòders. Obtenir una relació de transmissió que multipliqui l'entrada per un factor de 24 en la sortida del moviment, i de forma coaxial, en un mateix eix, ha resultat una tasca considerable. L'adaptació dels elements de fabricació pròpia als components comercials i normalitzats, o a la inversa, també ha estat un procés complex. Hi intervenen una infinitat de toleràncies dimensionals i geomètriques que cal tenir en compte a l'hora de projectar les peces.

Per altra banda, el desenvolupament de la part del muntatge electrònic i la programació íntegra del software de mesura han requerit d'una recerca d'informació exhaustiva.

d. Complexitat del projecte

A banda de tot això, durant el transcurs del projecte també s'ha fet palesa la complexitat amb la que pot comptar el producte de qualsevol tasca d'enginyeria. Tot i les limitacions i l'abast d'un projecte de final d'estudis com el present, el nivell de detall que es pot arribar a assolir és gairebé infinit. De fet, l'acotació d'aquesta complexitat, a l'hora de limitar l'aprofundiment en cadascuna de les temàtiques tractades, ha resultat una tasca dificultosa. El punt de fixació o aturada de l'abast de la memòria ha estat difícil de definir, sobretot quan el projectista té la voluntat de realitzar un projecte el més veraç i amb la màxima aplicabilitat real possible.

Ahora, el desenvolupament d'aquest treball ha servit a l'alumne per conscienciar-se envers les dimensions i la complexitat amb les que es treballa en l'àmbit industrial professional.

e. Aprenentatge i aplicació dels coneixements

Amb tot això, la present memòria representa un procés d'aprenentatge autònom difícil de quantificar. A banda de plasmar una gran part dels continguts propis de la titulació del Grau en Enginyeria Mecànica, l'alumne s'ha vist forçat a indagar i adquirir nous coneixements, teòrics i pràctics, en camps que fins ara eren desconeguts. La voluntat de dotar al projecte d'un recorregut considerable i de validar en un mateix la figura de l'enginyer han estat els factors motivadors principals.

10.1. Línies de treball futur

Vistos els resultats generals obtinguts i les conclusions extretes a partir de la lectura de la present memòria, es poden definir una sèrie de direccions o línies de treball futur. Aquestes marquen la o les trajectòries que caldria seguir en el supòsit que es volgués obtenir definitivament un prototip funcional de BAMC, amb les prestacions desitjades.

a. Calibratge del BAMC

Resulta indispensable conèixer l'error en la mesura del braç, la precisió doncs, per poder-lo controlar i corregir. Donat que el present disseny de 5 articulacions no s'adapta a la normativa revisada (només es contemplen models de BAMC de 6 i 7 articulacions), caldria desenvolupar un procediment normalitzat o estandarditzar de mesura de la precisió.

b. Software de mesura

El software de mesura actual presenta una sèrie de problemes i incompatibilitats a causa del seu desenvolupament des de zero i a través d'un procés d'aprenentatge autònom en el camp de la programació i l'electrònica per part del projectista. La recerca referents documentals i el desenvolupament total o parcial de nou del programari de mesura podria ajudar a la seva optimització.

c. Processos de fabricació

Com ja s'ha explicat detalladament en les conclusions, el procés de fabricació majoritari, la impressió tridimensional per FDM, en l'àmbit domèstic resulta materialitzar peces amb toleràncies de fabricació excessivament grans. A fi de millorar jocs i relacions entre elements mecànics, sobretot en les unitats articulares del braç, peça fonamental del disseny del BAMC projectat, s'haurien de buscar noves tècniques de fabricació. El mecanitzat per arrencament d'encenalls, en materials metàl·lics lleugers, com pugui ser l'alumini, podria ser una bona opció. De fet, aquesta i varietats similars són els processos de fabricació que utilitzen les grans empreses metroloògiques.

d. Dimensionament

Per altra banda, el procés de dimensionament s'ha realitzat majoritàriament de forma manual i en pocs dels elements funcionals del BAMC; això es deu, en gran mesura, a causa de la complexitat en l'anàlisi d'accions i sol·licitacions envers les unitats articulares cicloïdals. Un procés de dimensionament més acurat i detallat aportaria molt valor al projecte. També es podria aplicar una utilització més extensiva de tècniques d'anàlisi tensional com el MEF per simplificar el procés. Alhora, això evitaria la presència de peces excessivament sobredimensionades i el malbaratament de recursos que això implica.

e. Optimització de costos

En relació als costos materials i de fabricació, tot i que es pot continuar buscant un abaratiment respecte dels instruments de mesura comercials, cal enfocar-se a la seva optimització. És a dir, potser resulta convenient destinar recursos en major mesura en certes àrees del projecte, com pugui ser la fabricació o l'adquisició de components electrònics amb una precisió de lectura implícita superior, en el cas dels encòders òptics.

Bibliografia

1. Coca, R. P., i Rosique, J., **Tecnología mecánica y metrotecnica**, Ed. Piràmide, 8ª edició, pp. 132 – 160, (abril, 2002) ISBN 978-84-368-1663-1.
2. Raghavendra, N. V., i Krishnamurthy, L., **Engineering Metrology and Measurements**, Ed. Oxford University Press, 4ª edició, pp. 221 – 260, (octubre, 2013), ISBN 978-0-19-808549-2.
3. Hocken, R. J., i Pereira, P. H., **Coordinate Measuring Machines and Systems (Manufacturing Engineering and Materials Processing)**, Ed. CRC Press, 2ª edició, pp. 90 – 143, (juliol, 2011), ISBN 11-3807-689-9.
4. Dotson, R. H., i Thomson, R. L., **Fundamentals of Dimensional Metrology**, Ed. Thompson, 4ª edició, pp. 253 - 269, (agost, 2002), ISBN 07-6682-071-8.
5. Botsiber, D. W., i Kingston, L., **Design and performance of the cycloid speed reducer**, **Machine Design**, Article, *IRJET Journal*, pp. 65 – 69, (1956), DOI.
6. Rattan, S. S., **Theory of machines**, Ed. McGraw-Hill, 4ª edició, pp. 219 – 243, (maig, 2014), ISBN 007-014-477-X.
7. Boothroyd, W., i Winston, A.K., **Fundamentals of machining and machine tools**, Ed. CRC Press, 3ª edició, pp. 98 – 121, (gener, 2006), ISBN 11-3850-224-3.
8. Ashby, M. F., **Materials selection in mechanical design**, Ed. BH, 5ª edició, (gener, 2017), ISBN 008-100-599-7.
9. Shigley, J. E., **Teoría de máquinas y mecanismos**, Ed. McGraw-Hill, 2ª edició, (gener, 2001), ISBN 97-8968-451-2.
10. García, V. M., i Latorre, J. E., **Desenvolupament d'interfícies d'usuari**, Institut Obert de Catalunya, Dpt. d'Educació, 1ª edició, pp. 24 – 50, (setembre, 2010).
11. Ocaña, R. G., **Programación de circuitos electrónicos; iniciación con Arduino**, Ed. Dextra, 1ª edició, (març, 2021), ISBN 97-8841-794-6.
12. Cardona, F. S., i Clos, D. C., **Teoría de máquinas**, Edicions UPC, 2ª edició, pp. 61 – 80, (abril, 2011), ISBN 84-8301-452-1.
13. Venegas, L. V. U., **Diseño de elementos de máquinas**, Ed. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Mecánica, 1ª edició, pp. 155 – 161, (setembre, 2018), ISBN 978-958-722-301-9.
14. Zhang, T.; [et al.], **A Semi-Analytical Load Distribution Model for Cycloid Drives with Tooth Profile and Longitudinal Modifications**, Article, *Appl. Sci.*, (abril, 2020), DOI 10.3390/app10144859.
15. Hsieh, C. F., **Dynamics analysis of cycloidal speed reducers with pinwheel and nonpinwheel designs**, Article, *J. Mech.* (desembre, 2014), DOI 10.1115/1.4027850.

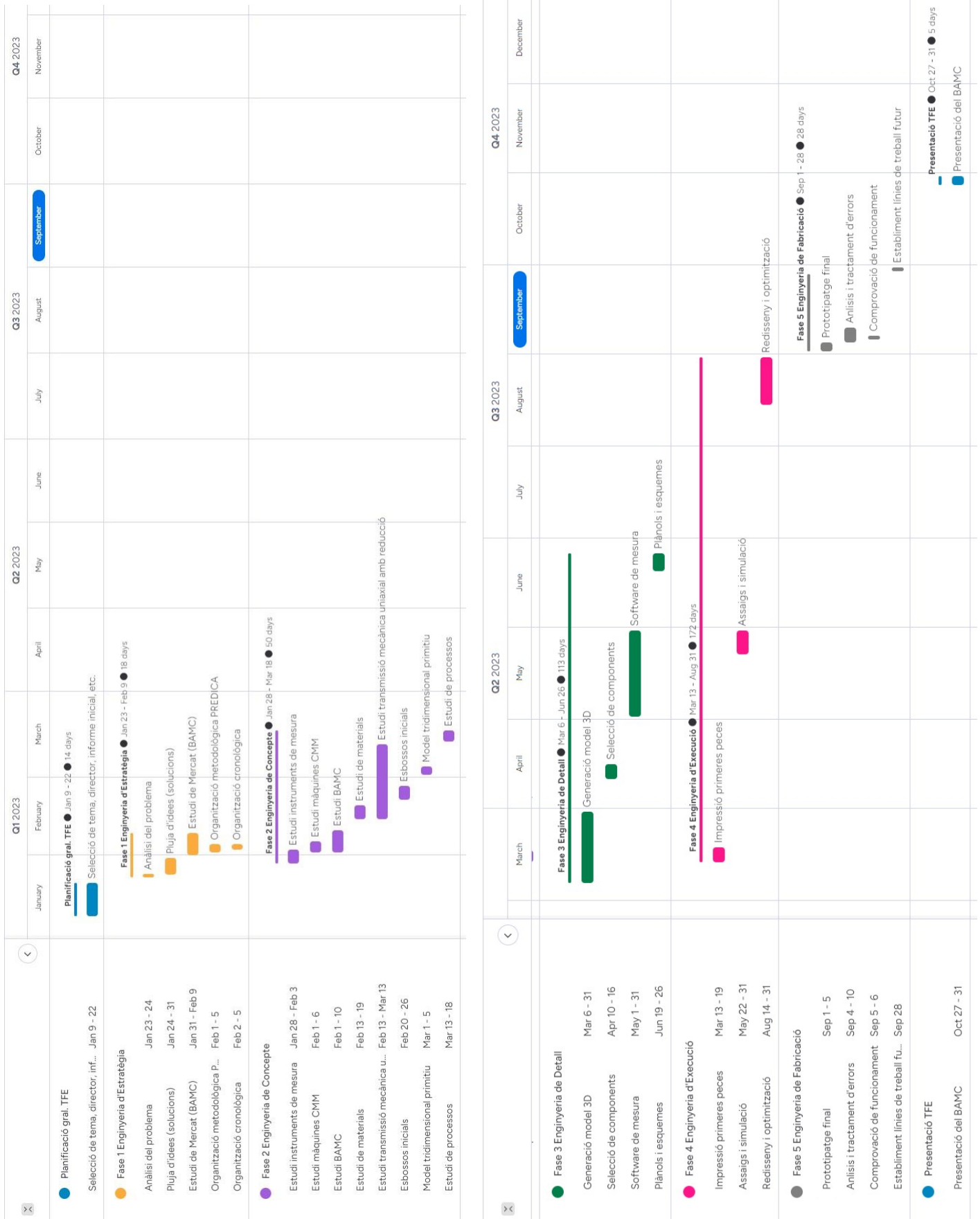
16. Càtaleg gral. rodament, FAG, **WL 41 520/SB**, Ed. Schaeffler, pp. 31 – 149, (gener, 2017).
17. Tymrak, B. M., i Kreiger, M., ***Mechanical Properties of Component Fabricated with Open-source 3D Printers Under Realistic Enviromental Conditions***, Article, (febrer, 2014), DOI 10.1016/j.matdes.2014.02.038.
18. Nikzad, M. [et al.], ***Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling***, Article, Journal Materials & Design, (gener, 2011), DOI 10.1016/j.matdes.2011.01.056.
19. Zhaua, Y., ***Additive Manufacturing: Making Imagination The Major Limitation***, The Mineras, metals & materials society, pp. 809-816, (gener, 2014), DOI 10.1005/s11837-014-0886-2.

Annexes

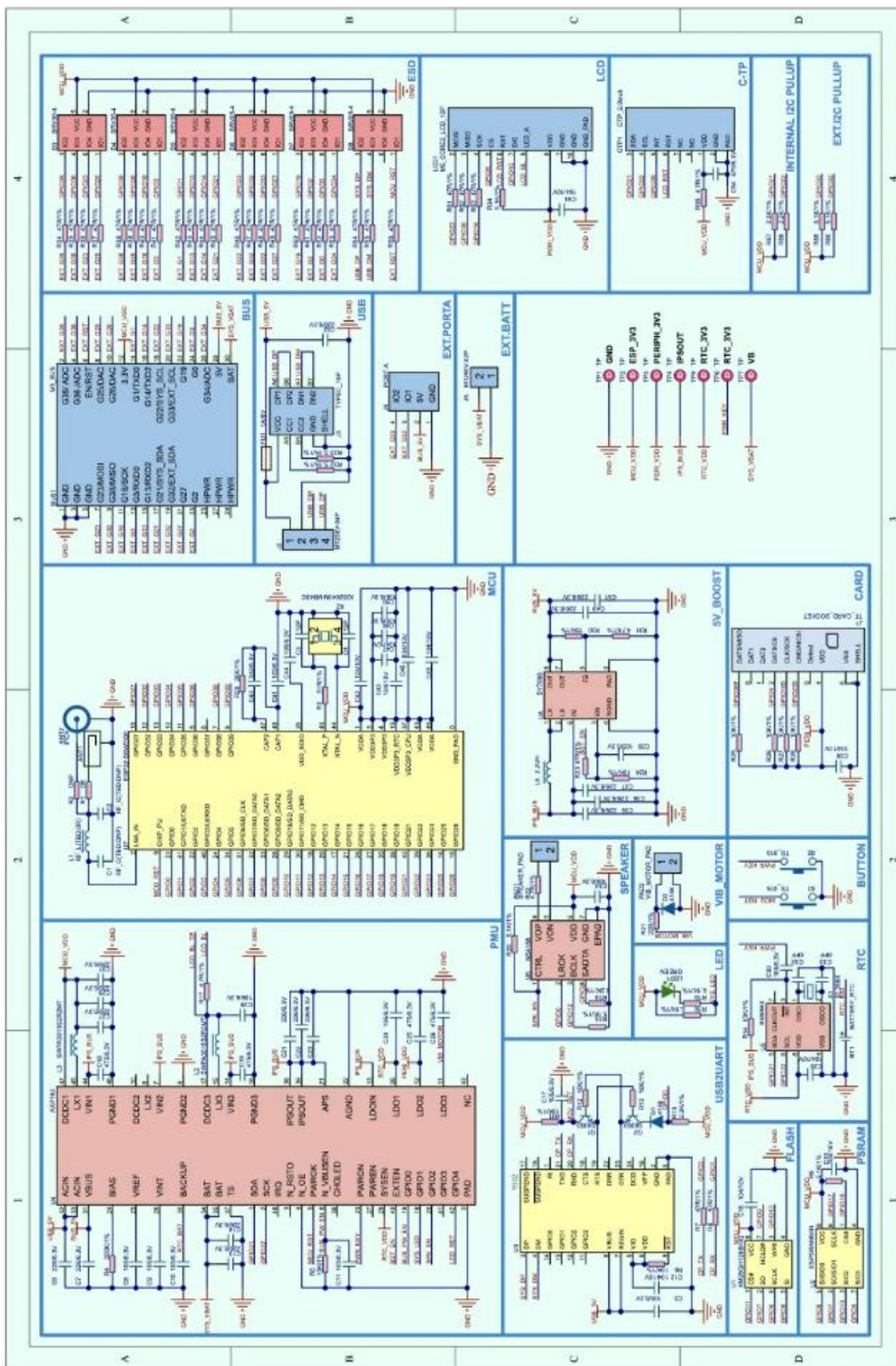
Sumari d'annexes

Annex 1 – Diagrama de Gantt	241
Annex 2 – <i>Pinmap M5Core2</i>	242
Annex 3 – <i>Plànol M5Core2</i>	243
Annex 4 – Plànol encóder òptic LPD3806-600BM-G5-24N	244
Annex 5 – Software de mesura (codi)	245

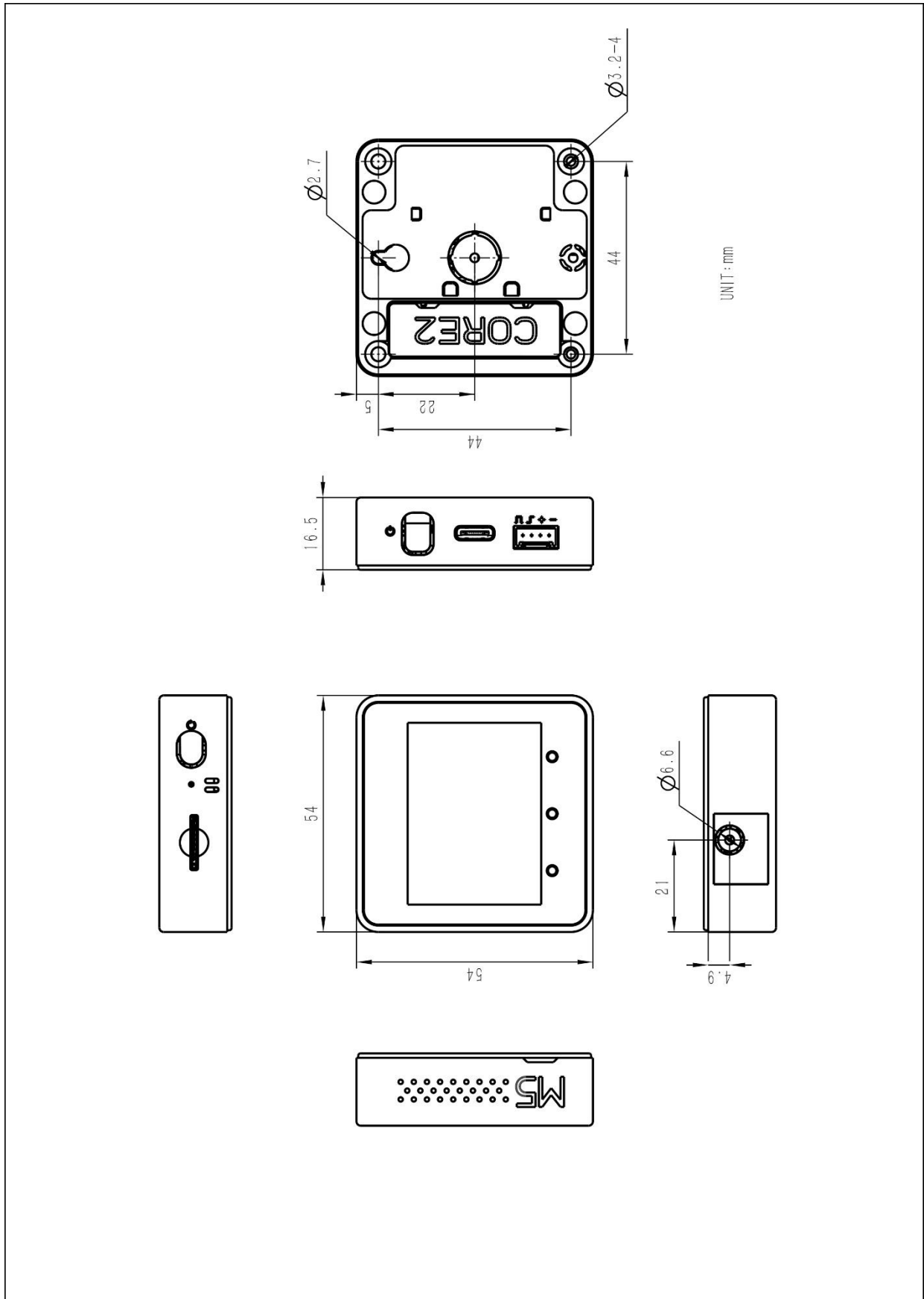
Annex 1 – Diagrama de Gantt



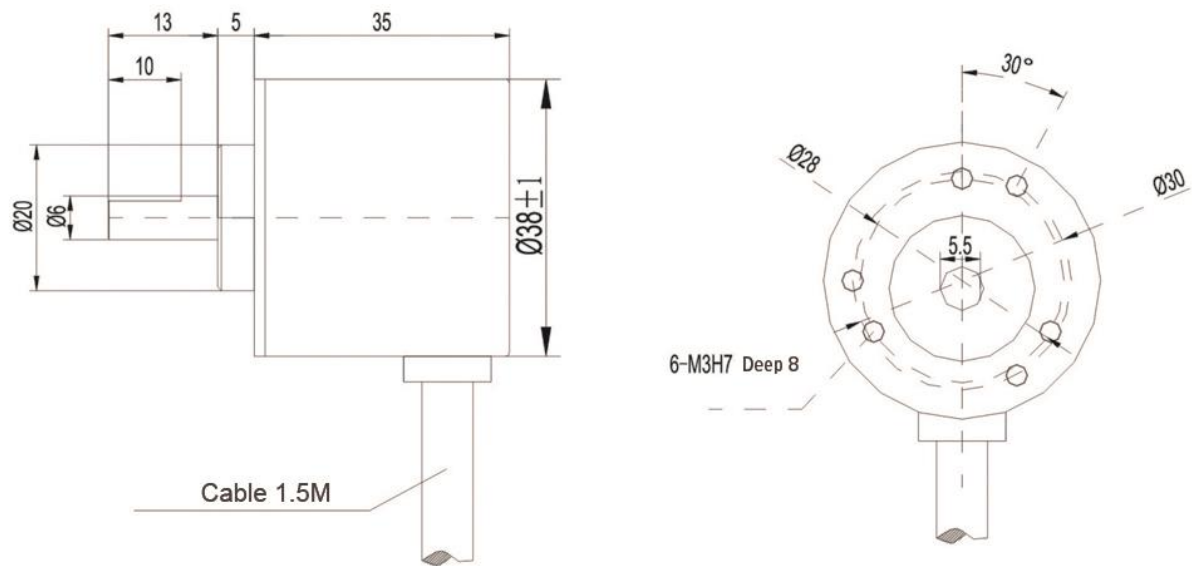
Annex 2 – Pinmap (schematics) M5Core2



Annex 3 – Plànol M5Core2



Annex 4 – Plànol encóder òptic LPD3806-600BM-G5-24N



Annex 5 – Software de mesura (codi)

```
1. //Biblioteques i fonts utilitzades
2. #include <M5Core2.h>
3. //#include <M5Unified.h>
4. #include <math.h>
5. #include "FreeSans15pt7b.h"
6. #include "FreeSansBold15pt7b.h"
7. #include "FreeSans10pt7b.h"
8. #include "FreeSans6pt7b.h"
9.
10. //Definició de les variables
11. //Estat inicial botons pantalla (polling)
12. bool btnAPrevState = false;
13. bool btnBPrevState = false;
14. bool btnCPrevState = false;
15.
16. //Coordenades punter menús de selecció
17. int x = 15;
18. int y = 70;
19.
20. //Comptadors
21. int i = 0; //Comptador polsador
22. int n = 1; //Comptador punts registrats
23. int j = 2; //Comptador punts registrats microSD
24.
25. //Variables generals
26. volatile float A2 = 0; //Encóder articulació A
27. volatile float A3 = 0; //Encóder articulació B
28. volatile float A4 = 0; //Encóder articulació C
29. volatile float A56 = 0; //Encóder articulació D
30. volatile float a2 = 0; //Encóder articulació A (rad)
31. volatile float a3 = 0; //Encóder articulació B (rad)
32. volatile float a4 = 0; //Encóder articulació C (rad)
33. volatile float a56 = 0; //Encóder articulació D (rad)
34.
35. float L1 = 100; //Longitud membre 1
36. float L2 = 114; //Longitud membre 2
37. float L3 = 600; //Longitud membre 3
38. float L4 = 500; //Longitud membre 4
39. float L56 = 178; //Longitud membres 5 i 6
40.
41. volatile float Px = 0; //Coordenada x del punt P del SAP
42. volatile float Py = 0; //Coordenada y del punt P del SAP
43. volatile float Pz = 0; //Coordenada z del punt P del SAP
44. volatile float Pxx = 0; //Coordenada x del punt P' del SAP
45. volatile float Pyy = 0; //Coordenada y del punt P' del SAP
46. volatile float Pzz = 0; //Coordenada z del punt P' del SAP
47. volatile float Px1 = 0; //Coordenada x del punt P1 del SAP
48. volatile float Py1 = 0; //Coordenada y del punt P1 del SAP
49. volatile float Pz1 = 0; //Coordenada z del punt P1 del SAP
50. volatile float Px2 = 0; //Coordenada x del punt P2 del SAP
51. volatile float Py2 = 0; //Coordenada y del punt P2 del SAP
52. volatile float Pz2 = 0; //Coordenada z del punt P2 del SAP
53.
54. volatile float d = 0; //Distància entre punts en l'espai
55. volatile float dxy = 0; //Projecció dist. entre punts en el pla XY
56. volatile float dxz = 0; //Projecció dist. entre punts en el pla XZ
57. volatile float dyz = 0; //Projecció dist. entre punts en el pla YZ
58. volatile float dx = 0; //Projecció dist. entre punts en l'eix OX
59. volatile float dy = 0; //Projecció dist. entre punts en l'eix OY
60. volatile float dz = 0; //Projecció dist. entre punts en l'eix OZ
61.
62. volatile float SRx = 0; //Coordenada x del SR nou
63. volatile float SRy = 0; //Coordenada y del SR nou
64. volatile float SRz = 0; //Coordenada z del SR nou
65.
66. void setup() {
67.     M5.begin();
68.     Serial.begin(115200);
69.     //M5.Speaker.begin();
70.     //M5.Speaker.setVolume(100);
71.
72. //Definició de les interrupcions
73. /*attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(G35), EncoderA_CanalA, CHANGE);
74. attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(G36), EncoderA_CanalB, CHANGE);
75. attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(G25), EncoderB_CanalA, CHANGE);
76. attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(G26), EncoderB_CanalB, CHANGE);
77. attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(G23), EncoderC_CanalA, CHANGE);
78. attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(G38), EncoderC_CanalB, CHANGE);*/
79. //attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(G18), EncoderD_CanalA, CHANGE);
80. //attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(G3), EncoderD_CanalB, CHANGE);
81. attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(G2), Polsador, CHANGE);
82.
```

```
83. M5.Lcd.fillScreen(TFT_WHITE);
84. M5.Lcd.setTextColor(TFT_BLACK);
85. M5.Lcd.setTextDatum(CC_DATUM);
86.
87. //Pantalla inicial I
88. M5.Lcd.fillRect(0, 30, 340, 32, LIGHTGREY);
89. M5.Lcd.fillRect(25, 20, 113, 50, WHITE);
90. //M5.Lcd.drawJpgFile(SD, "/logoEPSEVG.jpg", 240, 165);
91. M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
92. M5.Lcd.setCursor(30, 40);
93. M5.Lcd.print("BAMC");
94. M5.Lcd.setFont(&FreeSansBold15pt7b);
95. M5.Lcd.setCursor(30, 65);
96. M5.Lcd.print("MTV1.0");
97. M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
98. M5.Lcd.setCursor(65, 105);
99. M5.Lcd.print("Treball de Fi de Grau");
100. M5.Lcd.setCursor(30, 125);
101. M5.Lcd.print("Grau en Enginyeria Mecanica");
102. M5.Lcd.setCursor(75, 145);
103. M5.Lcd.print("Curs 2022 - 23, Q2");
104. M5.Lcd.setFont(&FreeSans6pt7b);
105. M5.Lcd.setCursor(30, 180);
106. M5.Lcd.print("Autor: Miquel Tuduri Benejam");
107. M5.Lcd.setCursor(30, 195);
108. M5.Lcd.print("Director: Juan Sole Rovira");
109. M5.Lcd.setCursor(30, 210);
110. M5.Lcd.print("Departament d'Enginyeria Mecanica");
111. if (!SD.begin()){
112.     error_SD();
113. }
114. delay(3000);
115.
116. //Pantalla inicial II
117. M5.Lcd.fillRect(25, 70, 300, 200, WHITE);
118. //M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
119. //M5.Lcd.setCursor();
120. //M5.Lcd.print("Projecte desenvolupat");
121. M5.Lcd.drawJpgFile(SD, "/logoEPSEVGUPC.jpg", 30, 110);
122. delay(3000);
123.
124. //Pantalla inicial III
125. M5.Lcd.fillRect(25, 70, 300, 200, WHITE);
126. M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
127. M5.Lcd.setCursor(110, 120);
128. M5.Lcd.print("Carregant...");
129. M5.Lcd.progressBar(40, 130, 240, 20, 20);
130. delay(500);
131. M5.Lcd.progressBar(40, 130, 240, 20, 40);
132. delay(500);
133. M5.Lcd.progressBar(40, 130, 240, 20, 60);
134. delay(500);
135. M5.Lcd.progressBar(40, 130, 240, 20, 80);
136. delay(500);
137. M5.Lcd.progressBar(40, 130, 240, 20, 100);
138. delay(1000);
139. M5.Lcd.fillScreen(TFT_WHITE);
140.
141. //Etiquetes botons de la pantalla
142. M5.Lcd.setFont(&FreeSans6pt7b);
143. M5.Lcd.setCursor(45, 230);
144. M5.Lcd.print("ant.");
145. M5.Lcd.setCursor(155, 230);
146. M5.Lcd.print("OK");
147. M5.Lcd.setCursor(260, 230);
148. M5.Lcd.print("seg.");
149.
150. //Pantalla Menú principal
151. M5.Lcd.fillRect(0, 0, 340, 30, LIGHTGREY);
152. M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
153. M5.Lcd.setCursor(10, 20);
154. M5.Lcd.print("Menu principal           MTV1.0");
155. M5.Lcd.setCursor(10, 50);
156. M5.Lcd.print("Selecciona un procediment");
157. M5.Lcd.setCursor(20, 90);
158. M5.Lcd.print("Mesura de punts (coordenades)");
159. M5.Lcd.setCursor(20, 130);
160. M5.Lcd.print("Mesura de longituds (distancies)");
161. M5.Lcd.drawRect(x, y, 290, 30, BLUE);
162. }
163.
164. //Comptador pulsacions del botó SAP
165. void Polsador() {
166.     if (digitalRead(G2) == HIGH) {
167.         i++;
```

```
168. //delay(100); //REVISAR(!)
169. }
170. }
171.
172. //Funció pas dels angles a radians incloent la precisió (aug. mecànic)
173. void Angle_Rad() {
174.   a2 = A2*2*PI/2400;
175.   a3 = A3*2*PI/2400;
176.   a4 = A4*2*PI/2400;
177.   a56 = A56*2*PI/2400;
178. }
179.
180. //Funció d'escriptura de les dades mesurades (coordenades) a la targeta microSD
181. void Arxiu_Punts_SD(volatile float a, volatile float b, volatile float c) {
182.   M5.update();
183.   if (!SD.begin()){
184.     error_SD();
185.   }
186.   else {
187.     if (SD.exists("/PuntsBAMC.txt")) {
188.       File Arxiu = SD.open("/PuntsBAMC.txt", FILE_APPEND);
189.       if (Arxiu) {
190.         Arxiu.read();
191.         Arxiu.print("P");
192.         Arxiu.print(j);
193.         Arxiu.print(" ");
194.         Arxiu.print(a);
195.         Arxiu.print(" ");
196.         Arxiu.print(b);
197.         Arxiu.print(" ");
198.         Arxiu.println(c);
199.         Arxiu.close();
200.         j++;
201.       }
202.     }
203.     else {
204.       File Arxiu = SD.open("/PuntsBAMC.txt", FILE_WRITE);
205.       if (Arxiu) {
206.         Arxiu.read();
207.         Arxiu.print(" Px ");
208.         Arxiu.print("Py ");
209.         Arxiu.println("Pz");
210.         Arxiu.print("P1");
211.         Arxiu.print(" ");
212.         Arxiu.print(a);
213.         Arxiu.print(" ");
214.         Arxiu.print(b);
215.         Arxiu.print(" ");
216.         Arxiu.println(c);
217.         Arxiu.close();
218.         j = 2;
219.       }
220.     }
221.   }
222. }
223.
224. //Funció d'escriptura de les dades mesurades (distàncies) a la targeta microSD
225. void Arxiu_Dist_SD(volatile float a, volatile float b, volatile float c, volatile float d){
226.   M5.update();
227.   if (!SD.begin()){
228.     error_SD();
229.   }
230.   else {
231.     if (SD.exists("/DistanciesBAMC.txt")) {
232.       File Arxiu = SD.open("/DistanciesBAMC.txt", FILE_APPEND);
233.       if (Arxiu) {
234.         Arxiu.read();
235.         Arxiu.print("P");
236.         Arxiu.print(j);
237.         Arxiu.print("-P");
238.         Arxiu.print(j+1);
239.         Arxiu.print(" ");
240.         Arxiu.print(a);
241.         Arxiu.print(" ");
242.         Arxiu.print(b);
243.         Arxiu.print(" ");
244.         Arxiu.print(c);
245.         Arxiu.print(" ");
246.         Arxiu.println(d);
247.         Arxiu.close();
248.         j = j + 2;
249.       }
250.     }
251.     else {
252.       File Arxiu = SD.open("/DistanciesBAMC.txt", FILE_WRITE);
```

```
253.     if (Arxiu) {
254.         Arxiu.read();
255.         Arxiu.print("          DistR  ");
256.         Arxiu.print("DistX  ");
257.         Arxiu.print("DistY  ");
258.         Arxiu.println("DistZ");
259.         Arxiu.print("P1-P2");
260.         Arxiu.print(" ");
261.         Arxiu.print(a);
262.         Arxiu.print(" ");
263.         Arxiu.print(b);
264.         Arxiu.print(" ");
265.         Arxiu.print(c);
266.         Arxiu.print(" ");
267.         Arxiu.println(d);
268.         Arxiu.close();
269.         j = 3;
270.     }
271. }
272. }
273. }
274.
275. //Pantalla d'error de la targeta microSD
276. void error_SD() {
277.     M5.Lcd.fillScreen(TFT_WHITE);
278.     M5.Lcd.fillRect(0, 0, 340, 30, LIGHTGREY);
279.     M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
280.     M5.Lcd.setCursor(10, 20);
281.     M5.Lcd.print("Error microSD          MTV1.0");
282.     M5.Lcd.setCursor(15, 50);
283.     M5.Lcd.print("S'ha detectat un error en la lectura");
284.     M5.Lcd.setCursor(20, 70);
285.     M5.Lcd.print("de la targeta microSD");
286.     M5.Lcd.setCursor(20, 100);
287.     M5.Lcd.print("1. Comprova que s'hagi inserit la");
288.     M5.Lcd.setCursor(25, 120);
289.     M5.Lcd.print("targeta");
290.     M5.Lcd.setCursor(20, 150);
291.     M5.Lcd.print("2. Comprova que la configuració");
292.     M5.Lcd.setCursor(25, 170);
293.     M5.Lcd.print("de format sigui FAT16 o FAT32");
294.     M5.Lcd.setCursor(20, 200);
295.     M5.Lcd.print("3. Reinicia el BAMC");
296.     M5.Lcd.drawRect(10, 80, 300, 135, RED);
297.     while(1) {
298.         //Espera infinita
299.     }
300. }
301.
302. //Menú principal (funcionament botons)
303. void loop() {
304.     M5.update(); //Actualitzar l'estat dels botons capacitius
305.     bool btnACurrentState = M5.BtnA.wasReleased(); //Verificar l'estat del botó A
306.     if (btnACurrentState && !btnAPrevState) {
307.         if (y == 70) {
308.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 290, 30, WHITE);
309.             y = 110;
310.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 290, 30, BLUE);
311.         }
312.         else {
313.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 290, 30, WHITE);
314.             y = 70;
315.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 290, 30, BLUE);
316.         }
317.     }
318.
319.     bool btnCCurrentState = M5.BtnC.wasReleased(); //Verificar l'estat del botó C
320.     if (btnCCurrentState && !btnCPrevState) {
321.         if (y == 70) {
322.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 290, 30, WHITE);
323.             y = 110;
324.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 290, 30, BLUE);
325.         }
326.         else {
327.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 290, 30, WHITE);
328.             y = 70;
329.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 290, 30, BLUE);
330.         }
331.     }
332.
333.     bool btnBCurrentState = M5.BtnB.wasReleased(); //Verificar l'estat del botó B
334.     if (btnBCurrentState && !btnBPrevState) {
335.         if (y == 70) {
336.             Menu_Punts();
337.         }
338.     }
339. }
```



```
338.     else {
339.         Menu_Distancies();
340.     }
341. }
342. delay(100); //Polling interval
343. }
344.
345. //Menú mesura de punts (coordenades)
346. void Menu_Punts(){
347.     M5.Lcd.fillScreen(TFT_WHITE);
348.     M5.Lcd.drawRect(x, y, 290, 30, WHITE);
349.     M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans6pt7b);
350.     M5.Lcd.setCursor(45, 230);
351.     M5.Lcd.print("ant.");
352.     M5.Lcd.setCursor(155, 230);
353.     M5.Lcd.print("OK");
354.     M5.Lcd.setCursor(260, 230);
355.     M5.Lcd.print("seg.");
356.
357.     M5.Lcd.fillRect(0, 0, 340, 30, LIGHTGREY);
358.     M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
359.     M5.Lcd.setCursor(10, 20);
360.     M5.Lcd.print("Mesura de punts                MTV1.0");
361.     M5.Lcd.setCursor(10, 50);
362.     M5.Lcd.print("Selecciona un tipus de SR");
363.     M5.Lcd.setCursor(20, 90);
364.     M5.Lcd.print("SR global (base)");
365.     M5.Lcd.setCursor(20, 130);
366.     M5.Lcd.print("SR nou (punt qualsevol)");
367.     M5.Lcd.drawRect(15, 70, 220, 30, BLUE);
368.
369.     while (true) {
370.         M5.update(); //Actualitzar l'estat dels botons capacitius
371.         bool btnACurrentState = M5.BtnA.wasReleased(); //Verificar l'estat del botó A
372.         if (btnACurrentState && !btnAPrevState) {
373.             if (y == 70) {
374.                 M5.Lcd.drawRect(x, y, 220, 30, WHITE);
375.                 y = 110;
376.                 M5.Lcd.drawRect(x, y, 220, 30, BLUE);
377.             }
378.             else {
379.                 M5.Lcd.drawRect(x, y, 220, 30, WHITE);
380.                 y = 70;
381.                 M5.Lcd.drawRect(x, y, 220, 30, BLUE);
382.             }
383.         }
384.
385.         bool btnCCurrentState = M5.BtnC.wasReleased(); //Verificar l'estat del botó C
386.         if (btnCCurrentState && !btnCPrevState) {
387.             if (y == 70) {
388.                 M5.Lcd.drawRect(x, y, 220, 30, WHITE);
389.                 y = 110;
390.                 M5.Lcd.drawRect(x, y, 220, 30, BLUE);
391.             }
392.             else {
393.                 M5.Lcd.drawRect(x, y, 220, 30, WHITE);
394.                 y = 70;
395.                 M5.Lcd.drawRect(x, y, 220, 30, BLUE);
396.             }
397.         }
398.
399.         bool btnBCurrentState = M5.BtnB.wasReleased(); //Verificar l'estat del botó B
400.         if (btnBCurrentState && !btnBPrevState) {
401.             if (y == 70) {
402.                 Coordenades_Punts();
403.             }
404.             else {
405.                 Coordenades_Punts_SR();
406.             }
407.         }
408.         delay(100); //Polling interval
409.     }
410. }
411.
412. //Menú mesura de longituds (distàncies)
413. void Menu_Distancies() {
414.     M5.Lcd.fillScreen(TFT_WHITE);
415.     M5.Lcd.drawRect(x, y, 290, 30, WHITE);
416.     M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans6pt7b);
417.     M5.Lcd.setCursor(45, 230);
418.     M5.Lcd.print("ant.");
419.     M5.Lcd.setCursor(155, 230);
420.     M5.Lcd.print("OK");
421.     M5.Lcd.setCursor(260, 230);
422.     M5.Lcd.print("seg.");
```

```
423.
424. M5.Lcd.fillRect(0, 0, 340, 30, LIGHTGREY);
425. M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
426. M5.Lcd.setCursor(10, 20);
427. M5.Lcd.print("Mesura de distancies          MTV1.0");
428. M5.Lcd.setCursor(10, 50);
429. M5.Lcd.print("Selecciona un procediment");
430. M5.Lcd.setCursor(20, 90);
431. M5.Lcd.print("Distancia en l'espai (R)");
432. M5.Lcd.setCursor(20, 130);
433. M5.Lcd.print("Distancia projectada (eixos SR)");
434. M5.Lcd.drawRect(15, 70, 285, 30, BLUE);
435.
436. while (true) {
437.     M5.update(); //Actualitzar estat dels botons capacitius
438.     bool btnACurrentState = M5.BtnA.wasReleased(); //Verificar l'estat del botó A
439.     if (btnACurrentState && !btnAPrevState) {
440.         if (y == 70) {
441.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 285, 30, WHITE);
442.             y = 110;
443.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 285, 30, BLUE);
444.         }
445.         else {
446.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 285, 30, WHITE);
447.             y = 70;
448.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 285, 30, BLUE);
449.         }
450.     }
451.
452.     bool btnCCurrentState = M5.BtnC.wasReleased(); //Verificar l'estat del botó C
453.     if (btnCCurrentState && !btnCPrevState) {
454.         if (y == 70) {
455.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 285, 30, WHITE);
456.             y = 110;
457.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 285, 30, BLUE);
458.         }
459.         else {
460.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 285, 30, WHITE);
461.             y = 70;
462.             M5.Lcd.drawRect(x, y, 285, 30, BLUE);
463.         }
464.     }
465.
466.     bool btnBCurrentState = M5.BtnB.wasReleased(); //Verificar l'estat del botó B
467.     if (btnBCurrentState && !btnBPrevState) {
468.         if (y == 70) {
469.             Distancia_Punts_R();
470.         }
471.         else {
472.             Distancia_Punts_Eixos();
473.         }
474.     }
475.     delay(100); //Polling interval
476. }
477. }
478.
479. //Funció obtenció de coordenades del punt P
480. void Coordenades_Punts() {
481.     i = 0;
482.     n = 1;
483.     while (i < 2) {
484.         M5.Lcd.fillScreen(TFT_WHITE);
485.         i = 0;
486.         while (i < 1) {
487.             M5.Lcd.fillRect(0, 0, 340, 30, LIGHTGREY);
488.             M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
489.             M5.Lcd.setCursor(10, 20);
490.             M5.Lcd.print("Coorde. en SR global          MTV1.0");
491.             M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
492.             M5.Lcd.setCursor(20, 60);
493.             M5.Lcd.print("1. Posiciona el SAP en el punt a");
494.             M5.Lcd.setCursor(25, 80);
495.             M5.Lcd.print("mesurar");
496.             M5.Lcd.setCursor(20, 110);
497.             M5.Lcd.print("2. Prem el polsador i manten la");
498.             M5.Lcd.setCursor(25, 130);
499.             M5.Lcd.print("posicio per registrar el punt");
500.             M5.Lcd.setCursor(20, 160);
501.             M5.Lcd.print("3. El so indica que el punt s'ha");
502.             M5.Lcd.setCursor(25, 180);
503.             M5.Lcd.print("registrat correctament");
504.             M5.Lcd.drawRect(10, 40, 300, 155, BLUE);
505.             M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans6pt7b);
506.             M5.Lcd.setCursor(20, 220);
507.             M5.Lcd.print("*Prem 2 cops el polsador per acabar el procediment");
```

```
508.     delay(3000);
509.   }
510.
511.   if (i == 1) {
512.     Angle_Rad();
513.     Pxx = L3*cos(a3)+L4*cos(a4)+L56*cos(a56);
514.     Pz = L1+L2+L3*sin(a3)+L4*sin(a4)+L56*sin(a56);
515.     Px = Pxx*cos(a2);
516.     Py = Pxx*sin(a2);
517.
518.     if (SD.begin()) {
519.       M5.Lcd.fillRect(0, 30, 340, 210, WHITE);
520.       M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
521.       M5.Lcd.setCursor(20, 60);
522.       M5.Lcd.print("Punt ");
523.       M5.Lcd.print(n);
524.       M5.Lcd.print(" registrat");
525.       M5.Lcd.drawRect(10, 75, 300, 110, BLUE);
526.       M5.Lcd.setCursor(20, 100);
527.       M5.Lcd.print("Coordenades del punt P");
528.       M5.Lcd.print(n);
529.       M5.Lcd.print(" (mm):");
530.       M5.Lcd.setCursor(130, 130);
531.       M5.Lcd.print("X ");
532.       M5.Lcd.print(Px);
533.       M5.Lcd.setCursor(130, 150);
534.       M5.Lcd.print("Y ");
535.       M5.Lcd.print(Py);
536.       M5.Lcd.setCursor(130, 170);
537.       M5.Lcd.print("Z ");
538.       M5.Lcd.print(Pz);
539.       Arxiu_Punts_SD(Px, Py, Pz);
540.       n++;
541.       //M5.Speaker.tone(2000, 200);
542.       //delay(200);
543.       //M5.Speaker.tone(4000, 200);
544.       delay(4000);
545.       i = 0;
546.     }
547.     else {
548.       error_SD();
549.     }
550.   }
551. }
552. M5.Lcd.fillScreen(TFT_WHITE);
553. M5.Lcd.fillRect(0, 30, 340, 32, LIGHTGREY);
554. M5.Lcd.fillRect(25, 20, 113, 50, WHITE);
555. M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
556. M5.Lcd.setCursor(30, 40);
557. M5.Lcd.print("BAMC");
558. M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSansBold15pt7b);
559. M5.Lcd.setCursor(30, 65);
560. M5.Lcd.print("MTV1.0");
561. M5.Lcd.drawRect(35, 85, 245, 30, BLUE);
562. M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
563. M5.Lcd.setCursor(40, 105);
564. M5.Lcd.println("Proces de mesura finalitzat");
565. M5.Lcd.setCursor(30, 140);
566. M5.Lcd.print("- Extreu la targeta microSD");
567. M5.Lcd.setCursor(35, 160);
568. M5.Lcd.print(" per obtenir les dades");
569. M5.Lcd.setCursor(30, 190);
570. M5.Lcd.print("- Reinicia el microcontrolador");
571. M5.Lcd.setCursor(35, 210);
572. M5.Lcd.print("per seguir utilitzant el BAMC");
573. }
574.
575. //Funció obtenció de coordenades del punt P respecte d'un nou SR
576. void Coordenades_Punts_SR() {
577.   i = 0;
578.   n = 1;
579.   while (i < 2) {
580.     M5.Lcd.fillScreen(TFT_WHITE);
581.     i = 0;
582.     while (i < 1) {
583.       M5.Lcd.fillRect(0, 0, 340, 30, LIGHTGREY);
584.       M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
585.       M5.Lcd.setCursor(10, 20);
586.       M5.Lcd.print("Coorde. en SR nou          MTV1.0");
587.       M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
588.       M5.Lcd.setCursor(20, 60);
589.       M5.Lcd.print("1. Posiciona el SAP en el punt");
590.       M5.Lcd.setCursor(25, 80);
591.       M5.Lcd.print("designat com l'origen del SR");
592.       M5.Lcd.setCursor(20, 110);
```

```
593.     M5.Lcd.print("2. Prem el polsador i manten la");
594.     M5.Lcd.setCursor(25, 130);
595.     M5.Lcd.print("posicio per registrar l'origen");
596.     M5.Lcd.setCursor(20, 160);
597.     M5.Lcd.print("3. El so indica que l'origen s'ha");
598.     M5.Lcd.setCursor(25, 180);
599.     M5.Lcd.print("registrat correctament");
600.     M5.Lcd.drawRect(10, 40, 300, 155, BLUE);
601.     M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans6pt7b);
602.     M5.Lcd.setCursor(20, 220);
603.     M5.Lcd.print("Prem 2 cops el polsador per acabar el procediment");
604.     delay(3000);
605. }
606.
607. if (i == 1) {
608.     Angle_Rad();
609.     Pxx = L3*cos(a3)+L4*cos(a4)+L56*cos(a56);
610.     SRz = L1+L2+L3*sin(a3)+L4*sin(a4)+L56*sin(a56);
611.     SRx = Pxx*cos(a2);
612.     SRY = Pxx*sin(a2);
613.     M5.Lcd.fillRect(0, 30, 340, 210, WHITE);
614.     M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
615.     M5.Lcd.setCursor(20, 60);
616.     M5.Lcd.print("Nou (0,0,0) del SR registrat");
617.     M5.Lcd.drawRect(10, 75, 300, 110, BLUE);
618.     M5.Lcd.setCursor(20, 100);
619.     M5.Lcd.print("Coordenades del nou (0,0,0)");
620.     M5.Lcd.setCursor(25, 120);
621.     M5.Lcd.print("(mm):");
622.     M5.Lcd.setCursor(130, 130);
623.     M5.Lcd.print("0x ");
624.     M5.Lcd.print(SRx);
625.     M5.Lcd.setCursor(130, 150);
626.     M5.Lcd.print("0y ");
627.     M5.Lcd.print(SRy);
628.     M5.Lcd.setCursor(130, 170);
629.     M5.Lcd.print("0z ");
630.     M5.Lcd.print(SRz);
631.     delay(3000);
632. }
633.
634. while (i < 2) {
635.     M5.Lcd.fillRect(0, 30, 340, 210, WHITE);
636.     i = 0;
637.     while (i < 1) {
638.         M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
639.         M5.Lcd.setCursor(20, 60);
640.         M5.Lcd.print("1. Posiciona el SAP en el punt a");
641.         M5.Lcd.setCursor(25, 80);
642.         M5.Lcd.print("mesurar");
643.         M5.Lcd.setCursor(20, 110);
644.         M5.Lcd.print("2. Prem el polsador i manten la");
645.         M5.Lcd.setCursor(25, 130);
646.         M5.Lcd.print("posicio per registrar el punt");
647.         M5.Lcd.setCursor(20, 160);
648.         M5.Lcd.print("3. El so indica que el punt s'ha");
649.         M5.Lcd.setCursor(25, 180);
650.         M5.Lcd.print("registrat correctament");
651.         M5.Lcd.drawRect(10, 40, 300, 155, BLUE);
652.         M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans6pt7b);
653.         M5.Lcd.setCursor(20, 220);
654.         M5.Lcd.print("Prem 2 cops el polsador per acabar el procediment");
655.         delay(3000);
656.     }
657.
658.     if (i == 1) {
659.         Angle_Rad();
660.         Pxx = L3*cos(a3)+L4*cos(a4)+L56*cos(a56);
661.         Pz = L1+L2+L3*sin(a3)+L4*sin(a4)+L56*sin(a56);
662.         Px = Pxx*cos(a2);
663.         Py = Pxx*sin(a2);
664.         Px = Px - SRx;
665.         Py = Py - SRY;
666.         Pz = Pz - SRz;
667.
668.         if (SD.begin()) {
669.             M5.Lcd.fillRect(0, 30, 340, 210, WHITE);
670.             M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
671.             M5.Lcd.setCursor(20, 60);
672.             M5.Lcd.print("Punt P");
673.             M5.Lcd.print(n);
674.             M5.Lcd.print(" registrat");
675.             M5.Lcd.drawRect(10, 75, 300, 110, BLUE);
676.             M5.Lcd.setCursor(20, 100);
677.             M5.Lcd.print("Coordenades del punt P");
```

```
678.         M5.Lcd.print(n);
679.         M5.Lcd.print(" (mm):");
680.         M5.Lcd.setCursor(130, 130);
681.         M5.Lcd.print("X ");
682.         M5.Lcd.print(Px);
683.         M5.Lcd.setCursor(130, 150);
684.         M5.Lcd.print("Y ");
685.         M5.Lcd.print(Py);
686.         M5.Lcd.setCursor(130, 170);
687.         M5.Lcd.print("Z ");
688.         M5.Lcd.print(Pz);
689.         Arxiu_Punts_SD(Px, Py, Pz);
690.         n++;
691.         //M5.Speaker.tone(2000, 200);
692.         //delay(200);
693.         //M5.Speaker.tone(4000, 200);
694.         delay(4000);
695.         i = 0;
696.     }
697.     else {
698.         error_SD();
699.     }
700. }
701. }
702. i = 2;
703. }
704. M5.Lcd.fillScreen(TFT_WHITE);
705. M5.Lcd.fillRect(0, 30, 340, 32, LIGHTGREY);
706. M5.Lcd.fillRect(25, 20, 113, 50, WHITE);
707. M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
708. M5.Lcd.setCursor(30, 40);
709. M5.Lcd.print("BAMC");
710. M5.Lcd.setFont(&FreeSansBold15pt7b);
711. M5.Lcd.setCursor(30, 65);
712. M5.Lcd.print("MTV1.0");
713. M5.Lcd.drawRect(35, 85, 245, 30, BLUE);
714. M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
715. M5.Lcd.setCursor(40, 105);
716. M5.Lcd.println("Proces de mesura finalitzat");
717. M5.Lcd.setCursor(30, 140);
718. M5.Lcd.print("- Extreu la targeta microSD");
719. M5.Lcd.setCursor(35, 160);
720. M5.Lcd.print(" per obtenir les dades");
721. M5.Lcd.setCursor(30, 190);
722. M5.Lcd.print("- Reinicia el microcontrolador");
723. M5.Lcd.setCursor(35, 210);
724. M5.Lcd.print("per seguir utilitzant el BAMC");
725. }
726.
727. //Funció obtenció de longitud en l'espai (R) entre dos punts P1 i P2
728. void Distancia_Punts_R() {
729.     i = 0;
730.     n = 1;
731.     while (i < 2) {
732.         //Adquisició del punt P1
733.         M5.Lcd.fillScreen(TFT_WHITE);
734.         i = 0;
735.         while (i < 1) {
736.             M5.Lcd.fillRect(0, 0, 340, 30, LIGHTGREY);
737.             M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
738.             M5.Lcd.setCursor(10, 20);
739.             M5.Lcd.print("Dist. entre punts en R          MTV1.0");
740.             M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
741.             M5.Lcd.setCursor(20, 60);
742.             M5.Lcd.print("1. Posiciona el SAP en el punt ");
743.             M5.Lcd.setCursor(25, 80);
744.             M5.Lcd.print("P");
745.             M5.Lcd.print(n);
746.             M5.Lcd.print(" a mesurar");
747.             M5.Lcd.setCursor(20, 110);
748.             M5.Lcd.print("2. Prem el polsador i manten la");
749.             M5.Lcd.setCursor(25, 130);
750.             M5.Lcd.print("posicio per registrar el punt");
751.             M5.Lcd.setCursor(20, 160);
752.             M5.Lcd.print("3. El so indica que el punt s'ha");
753.             M5.Lcd.setCursor(25, 180);
754.             M5.Lcd.print("regirat correctament");
755.             M5.Lcd.drawRect(10, 40, 300, 155, BLUE);
756.             M5.Lcd.setFont(&FreeSans6pt7b);
757.             M5.Lcd.setCursor(20, 220);
758.             M5.Lcd.print("Prem 2 cops el polsador per acabar el procediment");
759.             delay(3000);
760.         }
761.         n++;
762.     }
```

```
763.     if (i == 1){
764.         Angle_Rad();
765.         Pxx = L3*cos(a3)+L4*cos(a4)+L56*cos(a56);
766.         Pz1 = L1+L2+L3*sin(a3)+L4*sin(a4)+L56*sin(a56);
767.         Px1 = Pxx*cos(a2);
768.         Py1 = Pxx*sin(a2);
769.     }
770.
771. //Adquisició de punt P2
772.     if (i < 2) {
773.         M5.Lcd.fillRect(0, 30, 340, 210, WHITE);
774.         i = 0;
775.         while (i < 1) {
776.             M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
777.             M5.Lcd.setCursor(20, 60);
778.             M5.Lcd.setCursor(20, 60);
779.             M5.Lcd.print("1. Posiciona el SAP en el punt ");
780.             M5.Lcd.setCursor(25, 80);
781.             M5.Lcd.print("P");
782.             M5.Lcd.print(n);
783.             M5.Lcd.print(" a mesurar");
784.             M5.Lcd.setCursor(20, 110);
785.             M5.Lcd.print("2. Prem el polsador i manten la");
786.             M5.Lcd.setCursor(25, 130);
787.             M5.Lcd.print("posicio per registrar el punt");
788.             M5.Lcd.setCursor(20, 160);
789.             M5.Lcd.print("3. El so indica que el punt s'ha");
790.             M5.Lcd.setCursor(25, 180);
791.             M5.Lcd.print("registrat correctament");
792.             M5.Lcd.drawRect(10, 40, 300, 155, BLUE);
793.             M5.Lcd.setFont(&FreeSans6pt7b);
794.             M5.Lcd.setCursor(20, 220);
795.             M5.Lcd.print("*Prem 2 cops el polsador per acabar el procediment");
796.             delay(3000);
797.         }
798.         n++;
799.
800.         if (i == 1) {
801.             Angle_Rad();
802.             Pxx = L3*cos(a3)+L4*cos(a4)+L56*cos(a56);
803.             Pz2 = L1+L2+L3*sin(a3)+L4*sin(a4)+L56*sin(a56);
804.             Px2 = Pxx*cos(a2);
805.             Py2 = Pxx*sin(a2);
806.         }
807.
808. //Càlcul de la distància entre P1 i P2
809.         d = sqrt((Px2-Px1)*(Px2-Px1)+(Py2-Py1)*(Py2-Py1)+(Pz2-Pz1)*(Pz2-Pz1));
810.
811.         if (SD.begin()) {
812.             M5.Lcd.fillRect(0, 30, 340, 210, WHITE);
813.             M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
814.             M5.Lcd.setCursor(20, 60);
815.             M5.Lcd.print("Punts P");
816.             M5.Lcd.print(n-2);
817.             M5.Lcd.print(" i P");
818.             M5.Lcd.print(n-1);
819.             M5.Lcd.print(" registrats");
820.             M5.Lcd.drawRect(10, 75, 300, 150, BLUE);
821.             M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
822.             M5.Lcd.setCursor(20, 100);
823.             M5.Lcd.print("Distancia entre punts (mm):");
824.             M5.Lcd.setCursor(120, 130);
825.             M5.Lcd.print("dist. ");
826.             M5.Lcd.print(d);
827.             M5.Lcd.setFont(&FreeSans6pt7b);
828.             M5.Lcd.setCursor(20, 160);
829.             M5.Lcd.print("Coordenades dels punts P");
830.             M5.Lcd.print(n-2);
831.             M5.Lcd.print(" i P");
832.             M5.Lcd.print(n-1);
833.             M5.Lcd.print(" (mm):");
834.             M5.Lcd.setCursor(100, 180);
835.             M5.Lcd.print("X");
836.             M5.Lcd.print(n-2);
837.             M5.Lcd.print(" ");
838.             M5.Lcd.print(Px1);
839.             M5.Lcd.setCursor(100, 195);
840.             M5.Lcd.print("Y");
841.             M5.Lcd.print(n-2);
842.             M5.Lcd.print(" ");
843.             M5.Lcd.print(Py1);
844.             M5.Lcd.setCursor(100, 210);
845.             M5.Lcd.print("Z");
846.             M5.Lcd.print(n-2);
847.             M5.Lcd.print(" ");
```

```
848.     M5.Lcd.print(Pz1);
849.     M5.Lcd.setCursor(180, 180);
850.     M5.Lcd.print("X");
851.     M5.Lcd.print(n-1);
852.     M5.Lcd.print(" ");
853.     M5.Lcd.print(Px2);
854.     M5.Lcd.setCursor(180, 195);
855.     M5.Lcd.print("Y");
856.     M5.Lcd.print(n-1);
857.     M5.Lcd.print(" ");
858.     M5.Lcd.print(Py2);
859.     M5.Lcd.setCursor(180, 210);
860.     M5.Lcd.print("Z");
861.     M5.Lcd.print(n-1);
862.     M5.Lcd.print(" ");
863.     M5.Lcd.print(Pz2);
864.     Arxiu_Dist_SD(d, dx, dy, dz);
865.     delay(4000);
866. }
867. else {
868.     error_SD();
869. }
870. }
871. }
872. M5.Lcd.fillScreen(TFT_WHITE);
873. M5.Lcd.fillRect(0, 30, 340, 32, LIGHTGREY);
874. M5.Lcd.fillRect(25, 20, 113, 50, WHITE);
875. M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
876. M5.Lcd.setCursor(30, 40);
877. M5.Lcd.print("BAMC");
878. M5.Lcd.setFont(&FreeSansBold15pt7b);
879. M5.Lcd.setCursor(30, 65);
880. M5.Lcd.print("MTV1.0");
881. M5.Lcd.drawRect(35, 85, 245, 30, BLUE);
882. M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
883. M5.Lcd.setCursor(40, 105);
884. M5.Lcd.println("Proces de mesura finalitzat");
885. M5.Lcd.setCursor(30, 140);
886. M5.Lcd.print("- Extreu la targeta microSD");
887. M5.Lcd.setCursor(35, 160);
888. M5.Lcd.print(" per obtenir les dades");
889. M5.Lcd.setCursor(30, 190);
890. M5.Lcd.print("- Reinicia el microcontrolador");
891. M5.Lcd.setCursor(35, 210);
892. M5.Lcd.print("per seguir utilitzant el BAMC");
893. }
894.
895. //Funció obtenció de les projeccions de la distància entre dos punts P1 i P2 sobre els eixos del SR
896. void Distancia_Punts_Eixos() {
897.     i = 0;
898.     n = 1;
899.     while (i < 2) {
900.         //Adquisició del punt P1
901.         M5.Lcd.fillScreen(TFT_WHITE);
902.         i = 0;
903.         while (i < 1) {
904.             M5.Lcd.fillRect(0, 0, 340, 30, LIGHTGREY);
905.             M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
906.             M5.Lcd.setCursor(10, 20);
907.             M5.Lcd.print("Dist. entre punts en R          MTV1.0");
908.             M5.Lcd.setFont(&FreeSans10pt7b);
909.             M5.Lcd.setCursor(20, 60);
910.             M5.Lcd.print("1. Posiciona el SAP en el punt ");
911.             M5.Lcd.setCursor(25, 80);
912.             M5.Lcd.print("P");
913.             M5.Lcd.print(n);
914.             M5.Lcd.print(" a mesurar");
915.             M5.Lcd.setCursor(20, 110);
916.             M5.Lcd.print("2. Prem el polsador i mantén-la");
917.             M5.Lcd.setCursor(25, 130);
918.             M5.Lcd.print("posició per registrar el punt");
919.             M5.Lcd.setCursor(20, 160);
920.             M5.Lcd.print("3. El so indica que el punt s'ha");
921.             M5.Lcd.setCursor(25, 180);
922.             M5.Lcd.print("registrat correctament");
923.             M5.Lcd.drawRect(10, 40, 300, 155, BLUE);
924.             M5.Lcd.setFont(&FreeSans6pt7b);
925.             M5.Lcd.setCursor(20, 220);
926.             M5.Lcd.print("Prem 2 cops el polsador per acabar el procediment");
927.             delay(3000);
928.         }
929.         n++;
930.     }
931.     if (i == 1){
932.         Angle_Rad();
```

```
933.     Pxx = L3*cos(a3)+L4*cos(a4)+L56*cos(a56);
934.     Pz1 = L1+L2+L3*sin(a3)+L4*sin(a4)+L56*sin(a56);
935.     Px1 = Pxx*cos(a2);
936.     Py1 = Pxx*sin(a2);
937.   }
938.
939. //Adquisició de punt P2
940.   if (i < 2) {
941.     M5.Lcd.fillRect(0, 30, 340, 210, WHITE);
942.     i = 0;
943.     while (i < 1) {
944.       M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
945.       M5.Lcd.setCursor(20, 60);
946.       M5.Lcd.print("1. Posiciona el SAP en el punt ");
947.       M5.Lcd.setCursor(25, 80);
948.       M5.Lcd.print("P");
949.       M5.Lcd.print(n);
950.       M5.Lcd.print(" a mesurar");
951.       M5.Lcd.setCursor(20, 110);
952.       M5.Lcd.print("2. Prem el polsador i manten la");
953.       M5.Lcd.setCursor(25, 130);
954.       M5.Lcd.print("posicio per registrar el punt");
955.       M5.Lcd.setCursor(20, 160);
956.       M5.Lcd.print("3. El so indica que el punt s'ha");
957.       M5.Lcd.setCursor(25, 180);
958.       M5.Lcd.print("registrat correctament");
959.       M5.Lcd.drawRect(10, 40, 300, 155, BLUE);
960.       M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans6pt7b);
961.       M5.Lcd.setCursor(20, 220);
962.       M5.Lcd.print("Prem 2 cops el polsador per acabar el procediment");
963.       delay(3000);
964.     }
965.     n++;
966.
967.     if (i == 1) {
968.       Angle_Rad();
969.       Pxx = L3*cos(a3)+L4*cos(a4)+L56*cos(a56);
970.       Pz2 = L1+L2+L3*sin(a3)+L4*sin(a4)+L56*sin(a56);
971.       Px2 = Pxx*cos(a2);
972.       Py2 = Pxx*sin(a2);
973.     }
974.
975. //Càlcul de les distàncies entre P1 i P2
976.     d = sqrt((Px2-Px1)*(Px2-Px1)+(Py2-Py1)*(Py2-Py1)+(Pz2-Pz1)*(Pz2-Pz1));
977.     dx = sqrt((Px2-Px1)*(Px2-Px1));
978.     dy = sqrt((Py2-Py1)*(Py2-Py1));
979.     dz = sqrt((Pz2-Pz1)*(Pz2-Pz1));
980.
981.     if (SD.begin()) {
982.       M5.Lcd.fillRect(0, 30, 340, 210, WHITE);
983.       M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
984.       M5.Lcd.setCursor(20, 60);
985.       M5.Lcd.print("Punts P");
986.       M5.Lcd.print(n-2);
987.       M5.Lcd.print(" i P");
988.       M5.Lcd.print(n-1);
989.       M5.Lcd.print(" registrats");
990.       M5.Lcd.drawRect(10, 70, 300, 160, BLUE);
991.       M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
992.       M5.Lcd.setCursor(20, 95);
993.       M5.Lcd.print("Distàncies entre punts (mm):");
994.       M5.Lcd.setCursor(40, 125);
995.       M5.Lcd.print("distX.");
996.       M5.Lcd.setCursor(45, 145);
997.       M5.Lcd.print(dx);
998.       M5.Lcd.setCursor(140, 125);
999.       M5.Lcd.print("distY.");
1000.         M5.Lcd.setCursor(145, 145);
1001.         M5.Lcd.print(dy);
1002.         M5.Lcd.setCursor(240, 125);
1003.         M5.Lcd.print("distZ.");
1004.         M5.Lcd.setCursor(245, 145);
1005.         M5.Lcd.print(dz);
1006.         M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans6pt7b);
1007.         M5.Lcd.setCursor(20, 165);
1008.         M5.Lcd.print("Coordenades dels punts P");
1009.         M5.Lcd.print(n-2);
1010.         M5.Lcd.print(" i P");
1011.         M5.Lcd.print(n-1);
1012.         M5.Lcd.print(" (mm):");
1013.         M5.Lcd.setCursor(100, 185);
1014.         M5.Lcd.print("X");
1015.         M5.Lcd.print(n-2);
1016.         M5.Lcd.print(" ");
1017.         M5.Lcd.print(Px1);
```



```
1018.         M5.Lcd.setCursor(100, 200);
1019.         M5.Lcd.print("Y");
1020.         M5.Lcd.print(n-2);
1021.         M5.Lcd.print(" ");
1022.         M5.Lcd.print(Py1);
1023.         M5.Lcd.setCursor(100, 215);
1024.         M5.Lcd.print("Z");
1025.         M5.Lcd.print(n-2);
1026.         M5.Lcd.print(" ");
1027.         M5.Lcd.print(Pz1);
1028.         M5.Lcd.setCursor(180, 185);
1029.         M5.Lcd.print("X");
1030.         M5.Lcd.print(n-1);
1031.         M5.Lcd.print(" ");
1032.         M5.Lcd.print(Px2);
1033.         M5.Lcd.setCursor(180, 200);
1034.         M5.Lcd.print("Y");
1035.         M5.Lcd.print(n-1);
1036.         M5.Lcd.print(" ");
1037.         M5.Lcd.print(Py2);
1038.         M5.Lcd.setCursor(180, 215);
1039.         M5.Lcd.print("Z");
1040.         M5.Lcd.print(n-1);
1041.         M5.Lcd.print(" ");
1042.         M5.Lcd.print(Pz2);
1043.         Arxiu_Dist_SD(d, dx, dy, dz);
1044.         delay(4000);
1045.     }
1046.     else {
1047.         error_SD();
1048.     }
1049. }
1050. }
1051. M5.Lcd.fillScreen(TFT_WHITE);
1052. M5.Lcd.fillRect(0, 30, 340, 32, LIGHTGREY);
1053. M5.Lcd.fillRect(25, 20, 113, 50, WHITE);
1054. M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
1055. M5.Lcd.setCursor(30, 40);
1056. M5.Lcd.print("BAMC");
1057. M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSansBold15pt7b);
1058. M5.Lcd.setCursor(30, 65);
1059. M5.Lcd.print("MTV1.0");
1060. M5.Lcd.drawRect(35, 85, 245, 30, BLUE);
1061. M5.Lcd.setFreeFont(&FreeSans10pt7b);
1062. M5.Lcd.setCursor(40, 105);
1063. M5.Lcd.println("Proces de mesura finalitzat");
1064. M5.Lcd.setCursor(30, 140);
1065. M5.Lcd.print("- Extreu la targeta microSD");
1066. M5.Lcd.setCursor(35, 160);
1067. M5.Lcd.print(" per obtenir les dades");
1068. M5.Lcd.setCursor(30, 190);
1069. M5.Lcd.print("- Reinicia el microcontrolador");
1070. M5.Lcd.setCursor(35, 210);
1071. M5.Lcd.print("per seguir utilitzant el BAMC");
1072. }
1073.
1074. //Funcions mesura d'angles als encòders
1075. //Encoder art. A i angle a2
1076. void EncoderA_CanalA(){
1077.     if (digitalRead(G35) == digitalRead(G36)){
1078.         A2++;
1079.     } else {
1080.         A2--;
1081.     }
1082.     //delay(100);
1083. }
1084. void EncoderA_CanalB(){
1085.     if (digitalRead(G35) == digitalRead(G36)){
1086.         A2--;
1087.     } else {
1088.         A2++;
1089.     }
1090.     //delay(100);
1091. }
1092.
1093. //Encoder art. B i angle a3
1094. void EncoderB_CanalA(){
1095.     if (digitalRead(G25) == digitalRead(G26)){
1096.         A3++;
1097.     } else {
1098.         A3--;
1099.     }
1100.     //delay(100);
1101. }
1102. void EncoderB_CanalB(){
```

```
1103.         if (digitalRead(G25) == digitalRead(G26)){
1104.             A3--;
1105.         } else {
1106.             A3++;
1107.         }
1108.         //delay(100);
1109.     }
1110.
1111.     //Encoder art. C i angle a4
1112.     void EncoderC_CanalA(){
1113.         if (digitalRead(G23) == digitalRead(G38)){
1114.             A4++;
1115.         } else {
1116.             A4--;
1117.         }
1118.         //delay(100);
1119.     }
1120.     void EncoderC_CanalB(){
1121.         if (digitalRead(G23) == digitalRead(G38)){
1122.             A4--;
1123.         } else {
1124.             A4++;
1125.         }
1126.         //delay(100);
1127.     }
1128.
1129.     //Encoder art. D i angle a56
1130.     void IRAM_ATTR EncoderD_CanalA(){
1131.         if (digitalRead(G18) == digitalRead(G3)){
1132.             A56++;
1133.         } else {
1134.             A56--;
1135.         }
1136.         //delay(100);
1137.     }
1138.     void EncoderD_CanalB(){
1139.         if (digitalRead(G18) == digitalRead(G3)){
1140.             A56--;
1141.         } else {
1142.             A56++;
1143.         }
1144.         //delay(100);
1145.     }
1146.
```