

Projecte Final de Carrera
Enginyeria Industrial

**ESTUDI DE LA IMPLANTACIÓ D'UN ROBOT
ANTROPOMÒRFIC PER AL MECANITZAT D'ELEVADA
COMPLEXITAT**



Director: **Jose Antonio Ortiz**
Tutor Empresa: **Jordi Ribatallada**
Autor: **Ricard Poch de Riquer**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrassa
Setembre 2009

a l'Isa

Resum (Català)

El present treball analitza els aspectes que afecten a l'ús de robots antropomòrfics per a realitzar tasques de mecanitzat, en el cas concret del fresat de 6 eixos.

Aquest projecte s'ha realitzat amb el conveni de col·laboració Universitat - Empresa. Sent la *Universitat Politècnica de Catalunya*, i com a empresa el *Centre Tecnològic Ascamm (Unitat Equips, Automatitzacions i Mecatrònica)*.

Primerament s'analitza l'**estat de l'art** actual tant de les tècniques de mecanitzat, com dels robots i manipuladors industrials. Es prossegueix amb una discussió sobre la problemàtica d'integrar aquest dos sistemes i realitzar una tasca no estandarditzada.

S'ha realitzat un **projecte de detall** de l'estació experimental, que inclou un robot de gran dimensions (*ABB model IRB6640*), un mandrí d'elevada potència (10kW), els respectius controladors, un plat divisor amb mordassa, i un ordinador on es realitza la programació off-line i en CAM.

Els **software** utilitzats són diversos: *MasterCam x4*, amb un mòdul per fer la simulació i post-processat amb robot, el *RobotMaster*, i el *RobotStudio* d'*ABB*. Tanmateix s'han realitzat els càlculs manuals de les matrius homogènies.

Finalment s'ha realitzat una sèrie d'**experiments** per comprovar les precisions dimensionals no analitzada fins ara, ja que es realitza la tasca conjunta de gestionar les trajectòries per part del robot i el fet de mecanitzar. Dits experiments s'han realitzat amb provetes de *Porexpan®*.

Gracies als experiments s'ha realitzat un **model empíric** on s'obté la precisió a partir de les condicions de treball. Amb dit model s'ha creat un **protocol** per als programadors de control numèric, per tal que coneixin els resultats en precisió abans de realitzar el treball, i així poder programar més eficientment.

Resumen (Castellano)

El presente trabajo analiza los aspectos que afectan al uso de robots antropomórficos para la realización de tareas de mecanizado, en el caso concreto del fresado de 6 ejes.

Primeramente se analiza el **estado del arte** actual tanto de las técnicas de mecanizado, como de los robots y manipuladores industriales. Se prosigue con una discusión sobre la problemática de integrar éste dos sistemas y realizar una tarea no estandarizada.

Se ha realizado un **proyecto de detalle** de la estación experimental, que incluye un robot grande dimensiones (*ABB* modelo *IRB6640*), un escariador de elevada potencia (10 kW), los respectivos controladores, un plato divisor con mordaza, y una computador donde se realiza la programación off-line y en CAM. El **software** utilizado son diversos: *MasterCam x4*, con un módulo para hacer la simulación y post-procesado con robot, el *RobotMaster*, y el *RobotStudio* de *ABB*. Sin embargo se han realizado los cálculos manuales de las matrices homogéneas.

Finalmente se ha realizado una serie de **experimentos** para comprobar la precisión dimensional no analizada hasta ahora, ya que se realiza la tarea conjunta de gestionar las trayectorias por parte del robot y el hecho de mecanizar. Dichos experimentos se han realizado con probetas de Porexpan®.

Gracias a los experimentos se ha realizado un **modelo empirico** donde se obtiene la precisión a partir de las condiciones de trabajo. Con dicho modelo se ha creado un **protocolo** para programadores de control numérico, para que conozcan los resultados en cuanto a precisiones antes de realizar los trabajos, y así poder programar más eficientemente.

Abstract (English)

The present project intends to analyze the aspects related to the use of anthropomorphic robots to carry out mechanized tasks, in the concrete case of 6 axes mill.

This project has been developed in agreement between **Universitat Politècnica de Catalunya**, and **Ascamm Technological Center** (*Unitat Equips, Automatitzacions i Mecatrònica*).

Firstly the **state of art** is analyzed; the mechanization techniques and the robots and industrial manipulators. Followed by a discussion about the problems of integrating these two systems and to carry out a non standardized task.

A **detailed project** of the experimental station has been carried out, that includes a robot with big dimensions (*ABB model IRB6640*), a chuck of high power (10 kW), of their respective controllers, a dish divisor with gag, and one computer where the off-line programming is carried out and in CAM.

The software used are diverse: *MasterCam x4*, with a module to make the simulation and post-processed with a robot, it's *RobotMaster*, and the *ABB's RobotStudio*. Also the manual calculations of the homogeneous matrices have been carried out.

Finally a series of **experiments** to check out the dimensional accuracies have been carried out, that hadn't been analyzed until now, since the joint task is carried out of managing the trajectories on the part of the robot and the fact that mechanizes. These experiments have been carried out with test tubes of *Porexpan®*.

Due to the experiments, an **empirical model** of accuracy has been created. With this model there has been developed a **protocol** for numerical control programmers, thanks to this protocol we will improve the task accuracy.

Abstract (Italiano)

In questa Tesis si analizzano i aspetti che influiscono sull'uso dei robot antropomorfici per la realizzazione del meccanizzato a 6 assi.

Prima è stato studiato lo **stato dell'arte**, tanto per i centri di meccanizzato come per la robotica e manipolatori industriali. Inseguito è stata fatta una discussione della problemática d'integrazione di questi due sistemi e realizzazione un lavoro non standard.

È stato realizzato un **progetto costruttivo** di una stazione sperimentale, costituita da un robot di grandi dimensioni (ABB IRB6640), un elettromandrino d'elevata potenza (10kW), e sue rispettivi sistemi di controllo, un pliato giratorio con la sua morsa, e una PC dove si realizza la programmazione off-line e il CAM.

Gli **software** utilizzati sono diversi: MasterCam x4, con un modulo per fare la simulazione e post-processo con il robot, il RobotMaster, e il RobotStudio d'ABB. Quindi sono stati realizzati i calcoli manuali delle Matrici Omegenee.

Per finire sono stati realizzati diversi **esperimenti** per verificare la precisione dimensionale fino ora non analizzata, perche si devono realizzare il lavoro congiunto di gestione delle traiettorie del robot e realizzare il meccanizzato. Questi esperimenti sono stati fatti con blocchi di Porexpan®.

Grazie a questi esperimenti è stato fatto un **modelo empirico** dove conosciamo la precisione dimensionale grazie alle condizioni di lavoro del sistema. Con questo modello si è svilupatto un **protocollo** per i programmatori di controllo numerico, per conoscere il risultato prima di reazzare il meccanizzato, e potere miglorare la efficienza dei processi.

Índex

Resum (Català).....	5
Resumen (Castellano).....	6
Abstract (English)	7
Abstract (Italiano).....	8
Índex.....	9
Índex de Figures, Gràfiques i Taules.....	12
Prefaci.....	15
1. INTRODUCCIÓ	17
1.1. Objecte	17
1.2. Abast.....	17
1.3. Especificacions Bàsiques	17
1.4. Antecedents	18
1.5. Justificació	19
1.6. Programació.....	20
2. ESTAT DE L'ART	21
2.1. Estat de l'Art del Mecanitzat	21
2.1.1. Control Numèric	22
2.1.2. Tipus de Fresadores	24
2.1.3. Moviments.....	25
2.1.4. Característiques	26
2.1.5. Equipament d'una Fresadora de Control Numèric.....	26
2.1.6. Subjecció d'Eines.....	27
2.1.7. Subjecció de Peces.....	28
2.1.8. Eines de Tall	28
2.1.9. Verificació i posta a punt.....	30
2.1.10. Operacions de Fresat.....	31
2.1.11. Mecanitzat Ràpid	31
2.1.12. Fresat en Sec i amb Refrigerant	31
2.1.13. Gestió Econòmica del Fresat.....	32
2.2. Estat de l'Art de la Robòtica.....	35
2.2.1. Cronologia.....	35
2.2.2. Conceptes Generals	36
2.2.2.1. Robots de primera generació.....	37
2.2.2.2. Robots de segona generació	38
2.2.2.3. Robots de tercera generació.....	38
2.2.3. Cadena cinemàtica i tipus de robots	39
2.2.3.1. Cartesià.....	41

2.2.3.2.	Cilíndric	41
2.2.3.3.	Polar o esfèric	42
2.2.3.4.	SCARA.....	42
2.2.3.5.	Antropomòrfic o Articulat.....	43
2.2.3.6.	Estructura paral·lela	44
2.2.4.	Trajectòria	44
2.2.5.	Control.....	49
2.2.5.1.	Control Independent.....	49
2.2.5.2.	Control Centralitzat	51
2.2.6.	Empreses de Robots Antropomòrfics	51
3.	ESTACIÓ EXPERIMENTAL	53
3.1.	Elements de Màquines	56
3.1.1.	Robot.....	56
3.1.2.	Controladora del Robot.....	57
3.1.3.	Electro-mandrí.....	61
3.1.4.	Controlador del Mandrí	62
3.1.5.	Ordinador	63
3.1.6.	Plat Divisor	64
3.1.7.	Porta Eines.....	65
3.2.	Elements Consumibles	66
3.2.1.	Eines	66
3.3.	Elements de Càlcul	68
3.3.1.	Danavit- Hartenberg i Matriu Homogènia.....	68
3.3.2.	MasterCam®	74
3.3.3.	RobotMaster®.....	76
3.3.4.	RobotStudio®.....	77
3.4.	Integració de sistemes	79
4.	PROBLEMÀTICA DE L'ÚS DE ROBOTS ANTROPOMÒRFICS PER A MECANITZAR	83
4.1.	Robot	83
4.2.	Maquinabilitat.....	84
4.3.	Conclusions	87
5.	EXPERIMENTS	89
5.1.	Programació.....	89
5.2.	Metodologia	91
5.3.	Disseny d'Experiments	91
5.3.1.	Objectiu de l'Experiment	91
5.3.2.	Plantejament del Problema	91
5.3.3.	Factors i Domini Experimental	92

5.3.4.	Matriu d'Experiments	92
5.3.5.	Proveta i execució de l'experiment	93
5.3.6.	Resultats mesurats	98
5.3.7.	Pla d'experimentació.....	99
5.4.	Discussió.....	100
5.5.	Protocol pel Mecanitzat de Porexpan® amb un Robot Antropomòrfic.....	105
6.	GESTIÓ AMBIENTAL	107
7.	PRESSUPOST	108
8.	CONCLUSIONS.....	110
9.	VALORACIONS PERSONALS	112
10.	AGRAÏMENTS	114
11.	BIBLIOGRAFIA.....	116
	Apunts.....	116
	Llibres	117
	Treballs	118
	Planes web a Internet	118
	Material Audiovisual.....	119
	Normatives ISO	120

Annex A: Especificacions Tècniques dels Elements

- A.1 Especificacions Tècniques del Robot
- A.2 Especificacions Tècniques del Controlador del Robot
- A.3 Especificacions Tècniques de l'Electromandrí
- A.4 Especificacions Tècniques del RobotStudio®
- A.5 Especificacions Tècniques del Porexpan®

Índex de Figures, Gràfiques i Taules

Figura 1: Gantt del Projecte.....	20
Figura 9: Freses Integrals, plaquetes quadrades i plaquetes rodones.....	29
Figura 11: Cost Mecanitzat.....	33
Figura 12: Nomenclatura Robot [A.4].....	39
Figura 13: Canell Eulerià 2D i 3D [A.4].....	40
Figura 14: Canell Roll-Pitch-Yaw 2D i 3D [A.4].....	40
Figura 15: Robot Cartesià [W.4].....	41
Figura 16: Robot cilíndric [W.5].....	42
Figura 17: Robot Esfèric [A.6].....	42
Figura 18: Robot SCARA [W.6].....	43
Figura 19: Robot Antropomòrfic [A.4].....	43
Figura 20: Robot d'Estructura Paral·lela.....	44
Figura 21: Esquema de Gestió del Task Space al Joint Space.....	45
Figura 22: Control Descentralitzat 1 [A.4].....	50
Figura 23: Control Descentralitzat 2 [A.4].....	51
Figura 24: Estació Experimental.....	53
Figura 25: Funcionament de l'Estació Experimental, i la Tecnologia Utilitzada.....	54
Figura 26: Gestió del Control de l'Estació Experimental.....	55
Figura 27: Robot IRC6640.....	56
Figura 28: Controlador del Robot ABB IRC5 [W.20].....	57
Figura 30: Control del Robot.....	59
Figura 32: Armari Controlador del Mandrí.....	62
Figura 33: Computadora.....	63
Figura 34: Plat divisor i Mordassa.....	64
Figura 35: Porta-eines.....	65
Figura 36: Eines de Tall.....	67
Figura 38: Cotes del Robot [W.20].....	69
Figura 39: Bases de Referència en els Braços dels Robot [W.20].....	70
Figura 40: Matriu de Roto-Translació Base_Punta.....	72
Figura 41: MasterCam.....	75
Figura 43: RobotMaster.....	76
Figura 44: RobotStudio.....	78
Figura 45: Lay-out Estació Experimental.....	80
Figura 48: Proвета d'Assajos.....	94
Figura 49: Procés de Mecanitzat de la Proвета.....	94
Figura 50: Procés de Mecanitzat de la Proвета en MasterCam.....	95
Figura 51: Eina de Tall emprada en l'Experiment.....	95
Figura 52: Palmer Mesura forats.....	96
Figura 53: Peu de Rei Digital.....	96
Figura 54: Execució de les Mesures.....	97

Gràfica 1: Trajectòria 2-1-2.....	45
Gràfica 2: Velocitat Trapezoïdal	45
Gràfica 3: Acceleració Limitada.....	46
Gràfica 4: JERK de trajectòria 2-1-2.....	46
Gràfica 5: Trajectòria 3-2-1-2-3	47
Gràfica 6: Velocitat 2-1-2.....	47
Gràfica 7: Acceleració Limitada.....	47
Gràfica 8: JERK de 1r Grau.....	47
Gràfica 9: Diferència entre Mode Coordinat i Mode de Màxima Velocitat.....	48
Gràfica 10: Gantt Funcions.....	90
Gràfica 11: Gantt Recursos	91
Gràfica 12: Mapa de Precisió en Radi de la Fresa.....	102
Gràfica 13: Mapa de Precisió en l'Eix de la Fresa.....	102
Gràfica 14: Corbes Isoprecisió en l'Eix de la Fresa.....	103
Gràfica 15: Corbes Isoprecisió en Radi de la Fresa.....	103
Taula 1: Nomenclatura en els Materials de les Eines.....	30
Taula 2: Entrades del Controlador.....	58
Taula 3: Sortides del Controlador	58
Taula 4: Prestacions del Mandrí	61
Taula 5: Gestió de les Revolucions del Mandrí	63
Taula 6: Prestacions de l'Ordinador	64
Taula 7: Dimensions Portaeines.....	65
Taula 8: Eines de Tall.....	66
Taula 9: Paràmetres Danavit- Hartenberg.....	71
Taula 10: Tipus Connexions	79
Taula 11: Recursos Disponibles	89
Taula 12: Factors i Domini Experimental.....	92
Taula 13: Matriu d'Experiments d'un Disseny Factorial 2 ² , pla d'experimentació.....	93
Taula 14: Característiques Tècniques de l'Eina Utilitzada en l'Experiment.....	95
Taula 15: Característiques Tècniques del Palmer.....	96
Taula 16: Característiques Tècniques del Peu de Rei	96
Taula 17: Matriu d'Experiments d'un Disseny Factorial 2 ² , Pla d'Experimentació	98
Taula 18: Resultats Obtinguts en Precisió en l'Eix, Promig i Desviació Típica	98
Taula 19: Resultats Obtinguts en Precisió en l'Eix, Promig i Desviació Típica	98
Taula 20: Càlculs dels Efectes	99
Taula 21: Matriu dels efectes. Velocitat de Tall (Vc) i Avanç per Dent (fz).....	99
Taula 22: Opció 1 del Protocol, Dades d'Entrada Vc i fz.....	106
Taula 23: Opció 2 del Protocol, Dades d'Entrada F i s.....	106
Taula 24: Pressupost del Projecte de l'Experiment	108
Taula 25: Pressupost i Instal·lació Estació Robot	109

Prefaci

El treball presentat en aquesta memòria correspon a l'estudi tècnic de nous sistemes de fresat utilitzant robots antropomòrfics.

La present memòria es divideix en 7 apartats:

- Estat de l'art del Mecanitzat
- Estat de l'art de la Robòtica
- Projecte de detall de l'estació experimental
- Anàlisi de la problemàtica de la integració de sistemes
- Disseny i execució d'experiments
- Anàlisi de resultats
- Conclusions

Cal comentar, que el treball de camp ha estat, la instal·lació i integració dels sistemes que constitueixen l'estació experimental robotitzada, i els experiments realitzats.

En la redacció, s'ha procurat exposar tots els conceptes. No s'ha cregut necessari incloure un glossari en el projecte, ja que tots els termes específics s'han definit el primer cop que apareixen en el text.

A la versió digital també s'hi ha introduït hipervincles a les paraules que es refereixen a noms d'empreses i productes comercials, de forma que quan es clica la paraula (que sol estar ressaltada de color blau i subratllada) s'obre una finestra d'exploració d'Internet on apareix el producte en qüestió. Igualment, les referències a altres parts del projecte, també s'autoadrecen als capítols corresponents en clicar damunt de la paraula.

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Objecte

Avaluar, modelitzar i optimitzar els processos de mecanitzat d'alta complexitat amb la utilització de robots antropomòrfics.

1.2. Abast

En el present estudi s'analitzaran:

- L'estat de l'art del mecanitzat, centrat en el fresat.
- L'estat de l'art de la robòtica, centrat en els manipuladors industrials.
- Anàlisi de la problemàtica dels usos dels robots.
- Projecte constructiu de l'estació experimental robòtica.
- Integració del robot amb tots els elements necessaris per a mecanitzar, és a dir, la construcció d'una estació experimental.
- Utilització de programes específics per al control numèric del mecanitzat.
- Utilització de programes específics per a la simulació de l'entorn del robot.
- Característiques tècniques dels materials a mecanitzar, es a dir Porexpan®.
- Realització de proves de mecanitzat .
- Anàlisi de precisió i model empíric.
- Realització d'un protocol per a la mecanització de Porexpan® amb robots antropomòrfic.

1.3. Especificacions Bàsiques

- Normativa de Seguretat en l'estació experimental:
 - El personal a accedir ha d'estar qualificat.
 - Cal accedir a la cabina amb vestimenta de seguretat:
 - Botes.
 - Ulleres.

- Casc.
 - Roba ajustada, preferiblement de cotó.
- No portar joieria, com ara anells, polseres o collarets.
- Recomanable portar el cabell curt, si es té el cabell llarg s'ha de portar recollit.
- Mantenir el lloc de treball net i endreçat.
- Cal tenir cura amb els objectes contundents i esmoltats.
- Està prohibit accedir a la cabina del robot quan aquest està treballant. Ha d'existir un sistema automàtic que garanteixi aquest fet.
- Ha d'existir un parada d'emergència en l'interior i exterior de la cel·la de treball.
- Normativa d'assajos:
 - UNE-ISO 9283:1998 *Robots manipuladors industrials. Criteris d'optimització i mètodes d'anàlisi relacionats*
- Normativa mediambiental:
 - *Catàleg de Residus de Catalunya*
- Robot ABB IRC6640.
- El material a mecanitzar ha de esser Porexpan®.
- Ús de software específics.
 - De Control Numèric: MasterCam.
 - De simulació: RobotStudio i RobotMaster.

1.4. Antecedents

Tradicionalment les tasques de mecanització eren exclusives per a màquines de control numèric de 3 (fins com a màxim 5) eixos.

A més, les peces a treballar s'han de situar en el seu interior, i per aquest motiu han de tenir unes dimensions reduïdes, i, alhora les màquines són molt grans. Aquestes màquines no són gens versàtils, ja que només poden realitzar tasques de mecanitzats.

Com a aportació innovadora, el robot antropomòrfic té 6 eixos (6 graus de llibertat), permet realitzar una varietat de tasques molt elevada (des de extreure peces que surten d'una injectora fins a soldar o mecanitzar).

Per definició, els robots industrials estan dissenyats per a poder dur a terme diverses accions, per tant no són específics per a cap, fet que implica un gran nivell de coneixement per a realitzar l'integració en tasques de mecanitzat. Tanmateix no és una funció gens estesa.

1.5. Justificació

Per tal de trobar un equilibri òptim entre alta qualitat i eficiència de costos, degut a la alta flexibilitat en la producció industrial, les indústries cada cop més opten i optaran per aquest tipus de sistemes robotitzats.

Per tant, és imprescindible conèixer amb exactitud fins a quins nivells està desenvolupada la tecnologia per tal d'integrar-la en la indústria.

Amb la voluntat de contribuir en el desenvolupament de la indústria catalana, el *Centre Tecnològic Ascamm* realitza projectes d'innovació.

El interès del *Centre Tecnològic Ascamm* per tal de desenvolupar noves tecnologies en el camp de la robòtica va culminar amb la creació de la *Unitat d'Equips, Automatitzacions i Mecatrònica*.

És en aquest context, on es produeix la proposta de realització d'aquest projecte, com un pas endavant en la millora dels sistemes productius.

1.6. Programació

La programació global del projecte es presenta a la Figura 1

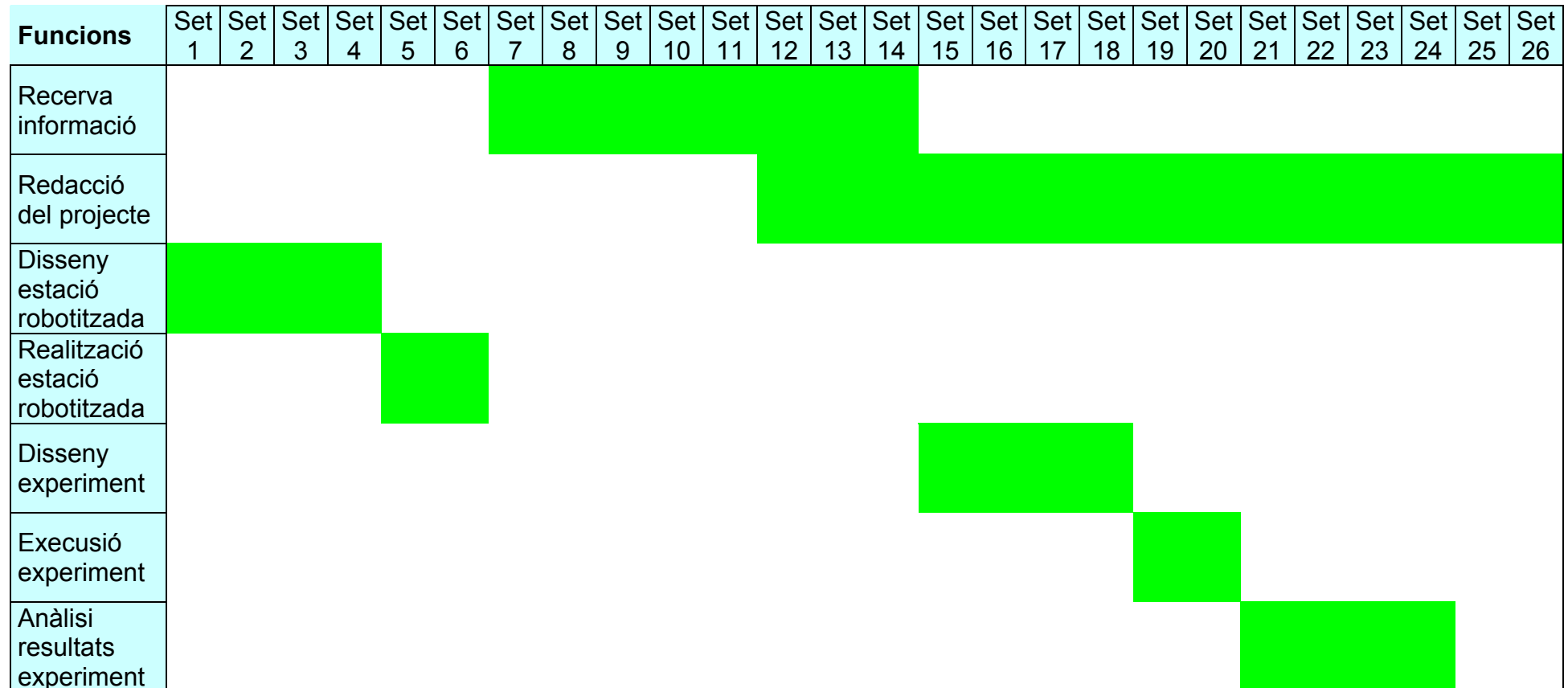


Figura 1: Gantt del Projecte

2. ESTAT DE L'ART

2.1. Estat de l'Art del Mecanitzat

Es pot definir la **fabricació** com el fet de realitzar productes (idees, bens i serveis) [L.2]. Quan aquests productes són bens físics i s'han de fabricar de forma precisa i amb bones propietats tècniques, es du a terme el procés conegut com a **Producció Industrial**.

Existeixen diversos mètodes de **Producció Industrial**, depenent de com es du a terme l'elaboració de la forma final:

- Aportació de Material: Soldadura, Injecció, Aportació Material Fos, etc.
- Canvi de forma: Forja, Estampació, Extrusió, Laminació, etc.
- Extracció de Material: **Mecanitzat**, Tall per aigua, Electroerosió etc.

El **Mecanitzat** és un mètode de Producció Industrial on, per assolir la forma final desitjada es treu material, de manera que es comença amb una forma (o preforma) en brut, que mitjançant el procés d'arrancar material assoleix la forma final desitjada.

Existeixen dos sistemes de mecanitzat:

- **Fresat**, on el que es mou es l'eina
- Tornejat, on el que es mou es la peça a mecanitzar

Una **fresadora**, és una màquina eina utilitzada per realitzar el **mecanitzat** mitjançant arrencament de ferritja (o altres materials) a partir del moviment d'una eina rotativa de varis fils de tall denominada **fresa**. En les fresadores tradicionals, l'eina es desplaça apropant-se a les zones a mecanitzar. Això permet obtenir formes diverses, des de superfícies planes a altres més complexes.

Inventades a principis del sXIX, les **fresadores** han esdevingut màquines bàsiques en el sector del **mecanitzat**. Gràcies a la incorporació del control numèric, són les màquines eina més polivalents, per la varietat de mecanitzats que poden realitzar i la flexibilitat que permeten en el procés de fabricació. La diversitat de processos mecànics i l'augment de la competitivitat global, han donat lloc a una ampla varietat de fresadores que encara que tenen una base comú, tot i que es diferencien notablement segons el sector industrial en el que s'estiguin utilitzant. Així mateix, els progressos tècnics de disseny i qualitat, que s'han realitzat en les eines de fresar, han fet possible

obtenir una elevada eficiència en el procés de tall, fet que comporta una reducció dràstica dels temps de mecanitzat.

Degut a la varietat de mecanitzats que es poden realitzar en les fresadores actuals; al gran ventall de màquines diferents entre si (tant en la seva potència com en les seves característiques tècniques); a la diversitat d'accessoris utilitzats; i a la necessitat de complir especificacions de qualitat rigoroses, la utilització de fresadores requereix de personal qualificat professionalment, ja sigui programador, preparador o fresador.

El fet d'emprar aquestes màquines, amb elements mòbils i tallants, així com líquids tòxics per la refrigeració i lubricació del tall, requereix unes condicions de treball que preserven la seguretat i salut dels treballadors i evitin danys a les màquines, a les instal·lacions i als productes finals o semielaborats.



Figura 2: Fresadora universal amb els seus accessoris [W.19]

2.1.1. Control Numèric

En la dècada dels '40 del segle passat, l'inventor nord-americà John T.Parsons, va inventar el primer desenvolupament de l'àrea de control numèric per ordinador.

La funció del control numèric, és gestionar el recorregut per la superfície a treballar de forma automatitzada, sense que un operari hagi de moure el capçal de la màquina eina manualment.



Figura 3: Fresadora de control numèric per computadora [W.3]

Les aplicacions del control numèric es divideixen en dues categories:

- **Màquina eina:** taladrat, fresat, laminat o tornejat
- **Sense màquina eina:** assemblatge, traçat, oxitall o metrologia.

El principi d'operació comú de totes les aplicacions, és el control de la posició relativa d'una eina o element de processat respecte a l'objecte a processar.

L'aplicació de les funcions d'interpolació lineal i circular i el canvi automàtic d'eines va fer possible la construcció d'una generació de màquines eina amb les quals es taladra, rosca, fresa i es torneja que han passat a anomenar-se *centres de mecanitzat* en comptes de fresadores.



Figura 4: Visualitzador de les cotes de dos eixos [W.19]

Les fresadores amb control numèric per ordinador són un exemple d'automatització programable. Es van dissenyar per adaptar-se a les variacions en la configuració de productes. La seva principal aplicació, es centra en volums de producció mitjans de peces senzilles, i, en volums de producció mitjans i baixos de peces complexes, permetent realitzar mecanitzats de precisió amb la facilitat que representa canviar d'un model de peça a un altre mitjançant la inserció del programa corresponent, i de les noves eines que s'hagin de fer servir així com el sistema de subjecció de les peces. En les grans producció en sèrie, el control numèric resulta d'utilitat per la robotització de l'alimentació i retirada de les peces mecanitzades.

Les fresadores universals modernes compten amb dispositius electrònics on es visualitzen (en forma més sofisticada en unes que altres) les posicions de les eines, la qual cosa facilita la lectura de cotes en els seus desplaçaments. De mateixa manera, moltes fresadores incorporen un sistema de control numèric per ordinador (CNC) que permet automatitzar el seu treball. També poden incorporar un mecanisme de compilació per diferents perfils de mecanitzat.

Existeixen diferents llenguatges de programació de CNC per fresadores, tots ells de programació numèrica, entre els quals destaquen:

- El llenguatge normalitzat internacional ISO
- El llenguatge HEIDENHAIN
- El llenguatge FAGOR
- El llenguatge SIEMENS.
-

Per desenvolupar un programa de CNC, habitualment es fan servir simuladors que, mitjançant la utilització d'un ordinador permeten comprovar la seqüència d'operacions programades.

Entre els avantatges del Control Numèric es poden destacar:

- Permet augmentar la productivitat respecte les màquines convencionals.
- El seu ús incideix favorablement en els costos de producció al reduir el número de tipus de màquines utilitzades.
- Manté o millora la qualitat.

Per contra, entre els inconvenients es pot trobar:

- Els processos en que s'utilitzen màquines eines de CNC tenen un cost horari superior als processos que utilitzen màquines convencionals.
- Els temps de preparació són majors en les màquines de control numèric

2.1.2. Tipus de Fresadores

Les fresadores es poden classificar segons diferents aspectes, com la orientació de l'eix de gir o el número d'eixos d'operació. A continuació s'indiquen les classificacions segons el nombre de eixos. Cal comentar que el nombre d'eixos són aquells graus de llibertat que es poden variar durant l'operació d'arrencament de ferritja, apart del propi moviment de rotació del mandrí.

- **Fresadora de tres eixos:** Pot controlar-se el moviment relatiu entre peça i eina en els tres eixos d'un sistema cartesià. Se'n poden distingir les següents variants segons l'orientació de l'eix de l'eina:
 - **Verticals**
 - **Horitzontals**
 - **Universals.** Permeten posicionar l'eina de treball en posició horitzontal o vertical alternativament.
 - **Especials.** Són fresadores amb característiques especials que poden classificar-se en determinats grups (circulars, de pòrtic, de pont mòbil o copiadores) Les formes constructives d'aquestes màquines varien segons les necessitats específiques de cada procés de fabricació
- **Fresadora de quatre eixos.** A més del moviment relatiu entre peça i eina en tres eixos, es pot controlar el gir de la peça sobre un eix, com amb un mecanisme divisor o un plat giratori. S'utilitzen per generar superfícies amb un patró cilíndric, com a engranatges o eixos estriats.

- **Fresadora de cinc eixos.** A més del moviment relatiu entre peça i eina en tres eixos, es pot controlar o bé el gir de la peça sobre dos eixos, un perpendicular a l'eix de l'eina i un altre paral·lel a ella (com amb un mecanisme divisor i un plat giratori en una fresadora vertical); o bé, el gir de la peça sobre un eix horitzontal i la inclinació de l'eina al voltant d'un eix perpendicular a l'anterior. S'utilitzen per generar formes complexes.



Figura 5: Fresadora CNC de cinc eixos amb capçal i taula giratòria [W.3]

En quan a les tecnologies de mecanitzat, les màquines de 5 eixos són les més modernes, i per conseqüències les més costoses. En el present projecte s'exposa poder fer el mecanitzat amb una **màquina de 6 eixos (robot antropomòrfic)**, per tant que pot realitzar tots els moviments possibles, corresponents 3 a posicions i 3 a rotacions.

2.1.3. Moviments

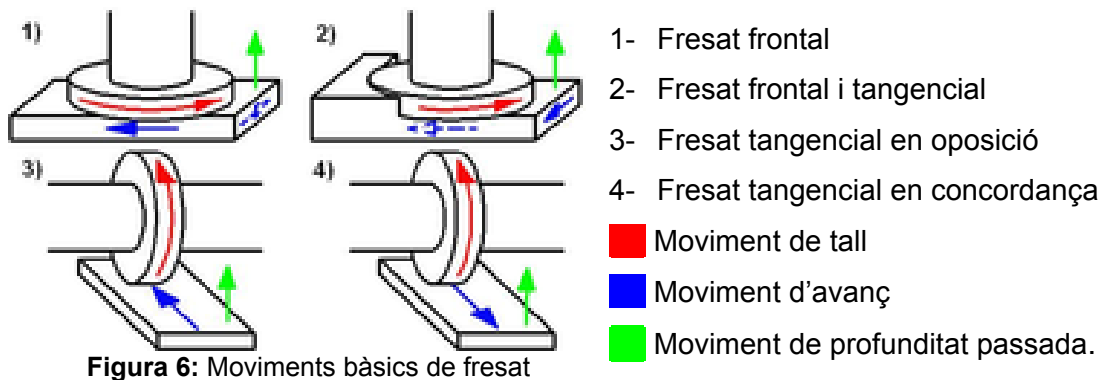


Figura 6: Moviments bàsics de fresat

Per tal de realitzar l'arrencament del material, ha d'existir una eina que es mogui respecte el material de desbastar. Aquets moviments relatius entre peça i eina es poden classificar en:

- Moviment de tall: és el que realitza la punta de l'eina al voltant de l'eix portaeines.
- Moviment d'avanç: és el moviment d'aproximació de l'eina des de la zona tallada a la zona sense tallar.

- Moviment de perforació o de profunditat de passada: moviment d'avanç que es realitza per augmentar la profunditat de tall.

Per tal de dur a terme aquest moviments relatius, es pot fer de dues maneres: desplaçant l'eina, o bé desplaçant la taula on es recolza el material.

2.1.4. Característiques

Les principals característiques a tenir en compte al seleccionar una fresadora per la seva adquisició són:

- Les dimensions de les peces a mecanitzar (estan limitades per les dimensions de la superfície de la taula). Aquesta limitació no apareix amb robots antropomòrfics ja que la taula de treball no està situada dintre de cap màquina.
- Les operacions a realitzar depenent d'aquestes pot ser necessària la possibilitat de controlar varis eixos a la vegada.
- El material de la peça, de les eines de tall i de les toleràncies de fabricació requerides. Depenent d'aquests, les velocitats de tall o de avanç variaran.
- Els dispositius electrònics de control permetran augmentar la productivitat i producció del procés productiu.
- Dispositius de seguretat com el de parada d'emergència o contra sobrecàrregues, pantalles contra la projecció de ferritja, etc.
- El pes de la màquina tindrà notable influència en el transport d'aquesta i les necessitats de cementació de la nau perquè les vibracions estiguin controlades.

2.1.5. Equipament d'una Fresadora de Control Numèric

Els equipaments que munten les fresadores actuals son molt variables en funció de les prestacions que tinguin.

Es necessari tenir en compte el llenguatge de programació que es possible utilitzar, i la capacitat de memòria de la màquina per un ús posterior dels programes emmagatzemats.

La CPU o unitat central de procés de la màquina, controla accionaments rotatius per els quals es fan servir servomotors que poden variar la seva velocitat en un rang continu. El moviment lineal dels carros de la taula s'obtenen transformant el moviment rotacional dels servomotors mitjançant eixos de boles sense joc

La CPU obté dades del programa i dels sensors instal·lats, els quals permeten establir una realimentació del control de les operacions. La precisió d'aquests sensors i la velocitat de processament de la CPU limiten la precisió dimensional que es pot obtenir.

A més a més dels moviments de la peça i de l'eina, poden controlar-se de manera automatitzada com ara altres paràmetres com l'eina emprada, que pot canviar-se des de un magatzem d'eines instal·lat en la màquina, l'ús o no d'un fluid refrigerant o l'obertura i tancament de les portes de seguretat.

Existeixen varis accessoris que s'instal·len en les fresadores per realitzar operacions de mecanitzat diferents o per una utilització amb major rapidesa, precisió i seguretat.

2.1.6. Subjecció d'Eines

Les fresas poden classificar-se segons el mecanisme de subjecció al portaeines en fresas amb mànec cònic, fresas amb mànec cilíndric i fresas per muntar en arbre. Existeixen moltes normatives i patents al respecte, ja que facilitar el canvi del portaeines significa un augment de productivitat. Aquest és un element molt important, ja que limitarà la rigidesa i les revolucions màximes de l'eina.



Figura 7: Portaeines amb Eina

2.1.7. Subjecció de Peces

Per aconseguir una bona fixació de les peces en la taula de treball d'una fresadora es fan servir diversos dispositius. El sistema de subjecció que s'adopti ha de permetre que la càrrega i descarrega de les peces en la taula de treball siguin ràpides i precises, garantir la repetibilitat de les posicions de les peces i el seu anclatge amb una rigidesa suficient. Existeixen dos tipus principals de fixació:

- Brides d'ajustatge
- Mordasses

Les mordasses poden ser de base fixa o de base giratòria, d'accionament manual o d'accionament hidràulic.



Figura 8: mordassa [W.19]

- Mordasses de base giratòria: muntades damunt d'un plat circular graduat.
- Mordasses hidràuliques: permeten automatitzar l'obertura i tancament d'aquestes així com la pressió de subjecció.

Ahora es pot instal·lar un mecanisme o plat divisor, on, damunt es situa la mordassa. Aquest dispositiu es fixa sobre la taula de la màquina i permet dues possibilitats: realitzar operacions espaiades angularment respecte a un eix de la peça a mecanitzar, o bé accedir a posicions amagades al capçal.

2.1.8. Eines de Tall

Les eines més emprades en una fresadora es denominen fresas encara que també es poden emprar altres eines per realitzar operacions diferents al fresat com són broques per taladrar o escairadors.

Les fresas són eines de tall de forma, material i dimensions molt variables d'acord amb el tipus de fresat que es vulgui realitzar. Una fresa està determinada per el seu diàmetre, forma, material, numero de dents que tingui i el sistema de subjecció a la màquina. La qualitat de les fresas es selecciona tenint en compte:

- El material de la peça

- El tipus d'aplicació
- Condicions de mecanitzat

Existeixen dos grans tipus de freses:

- Integrals: on tota la fresa treballa
- Porta plaquetes: on s'insereixen unes plaquetes intercanviables que concentren tot el treball i desgast

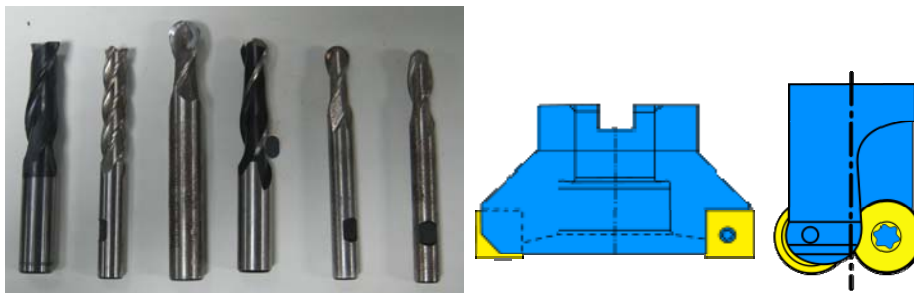


Figura 9: Freses Integrals, de plaquetes quadrades i de plaquetes rodones, respectivament

Les dents d'acer ràpid (HSS) poden ser rectilínies o helicoidals, i les freses que munten plaquetes intercanviables són de carbur metàl·lic com pot ser el carbur de tungstè (vídria), de metall-ceràmica o en casos especials, de nitrur de bor cúbic o de diamant policristal·lí. Els materials més durs en les arestes de tall permeten utilitzar majors velocitats de tall però al ser menys tenaces, exigeixen una velocitat d'avanç menor.

El número de dents de les freses depèn del seu diàmetre, de la quantitat de ferritja que ha d'arrencar, de la duresa del material, i del tipus de fresa.

La varietat de formes de les plaquetes és gran i està normalitzada (ISO 1832). Així mateix, la varietat de materials de les eines modernes es considerable i es troba en desenvolupament continu.

Els principals materials de les plaquetes de metall dur per fresat són els que es mostren a la taula1.

Material	Símbol
Metalls durs recoberts	HC
Metalls durs	H
Cermets	HT, HC
Ceràmiques	CA, CN, CC
Nitrur de bor cúbic	BN
Diamant policristal·lí	DP, HC

Taula 1: Nomenclatura en els Materials de les Eines [L.7]

2.1.9. Verificació i posta a punt

Per tal de poder certificar el bon funcionament, tant de les fresadores com de qualsevol instal·lació, és necessari controlar els següents paràmetres:

- Cimentació i anivellació: les fresadores han d'estar subjectes en ciments que amorteixen de la millor forma possible les vibracions, així com que estigui correctament anivellada per assegurar un bon funcionament a la taula en els desplaçaments sent necessari utilitzar nivells de precisió.
- Alineació: mitjançant l'ús de comparadors, s'ha de verificar que la taula estigui totalment alineada.
- Funcionament de l'eix porta fresas: s'ha de verificar periòdicament amb un comparador el possible descentrament de l'eix porta fresas en el seu moviment rotatori.
- Alineació dels punts del plat divisor i el contrapunt: es verifica l'altura i l'alineació d'aquests accessoris.
- Comprovació de la precisió dels nònus graduats: es verifica si els desplaçaments reals coincideixen amb la graduació dels tambors.
- Verificació del joc de l'eix porta fresas en la lluneta del carner: si hi ha un joc excessiu, és necessari procedir a la substitució del casquet de bronze de la lluneta.

2.1.10. Operacions de Fresat

El fresat s'ha convertit en un mètode polivalent de mecanitzat. El desenvolupament de les eines també ha contribuït a crear noves possibilitats de fresat a més d'incrementar de forma considerable la productivitat, la qualitat i exactitud de les operacions realitzades.

Amb les màquines més modernes fins el moments, és ha dir les de 5 eixos es poden realitzar mecanitzats amb formes molt complexes.

Cal tenir en compte, que un robot antropomòrfic té 6 eixos fet que permetrà una mobilitat major que amb els sistemes utilitzats fins ara, i per tant realitzar models més complexes

2.1.11. Mecanitzat Ràpid

El mecanitzat ràpid o d'alta velocitat (HSM) és refereix al que es produeix en les modernes màquines d'eines de control numèric equipades amb capçals potents i robustos que els hi permeten girar a molts milers de revolucions per minut fins aconseguir de l'ordre de 15.000 fins a 30.000 rpm, i avanços de treballs molt grans quan es tracta del mecanitzat de materials tous i amb molt buidat de ferritja, tal i com passa en la fabricació de motllos o de grans components de la indústria aeronàutica. Els metalls i aliatges de fàcil mecanització son els més adequats per el concepte de mecanitzat ràpid. Evidentment el Porexpan® és un material prou tou que permet fer servir aquesta tecnologia.

2.1.12. Fresat en Sec i amb Refrigerant

El fresat en sec de certs materials és viable quan s'utilitzen eines de metall dur, per això hi ha una tendència recent a efectuar els mecanitzats en sec sempre que la qualitat de l'eina ho permeti.

Tot i així, el mecanitzat en sec no és adequat per totes les aplicacions, especialment per taladrats, roscats i mandrinats per garantir l'evacuació de la ferritja, especialment si es fan servir fresas d'acers ràpid.



Figura 10: Fresat d'alumini utilitzant taladrina [W.19]

No es recomanable fresar en sec materials pastosos o massa tous com l'alumini o l'acer de baix contingut en carboni, ja que és molt probable que els fils de tall s'emboliquin amb el material que tallen, formen un fil d'aportació que causa imperfeccions en l'acabat superficial, dispersions en les mesures de la peça inclús ruptures dels fils de tall. La taladrina és imprescindible al fresar materials abrasius com l'acer inoxidable.

En el fresat en sec la maquinaria ha d'estar preparada per absorbir sense problemes el calor produït en l'acció de tall. Per evitar excessos de temperatura per el sobreescalfament dels eixos, eines i altres elements, incorporen circuits interns de refrigeració per oli o aire.

El fresat en sec s'ha generalitzat i ha servit perquè les empreses s'hagin qüestionat fer servir taladrina, o qualsevol altre refrigerent, només en les operacions necessàries i amb el cabal necessari. És necessari avaluar amb compte operacions, materials, peces, exigències de qualitat i maquinaria per identificar els beneficis d'eliminar l'aportament de refrigerant.

2.1.13. Gestió Econòmica del Fresat

La suma del cost de la matèria prima d'una peça, el cost del procés de mecanitzat i el cost de les peces fabricades de forma defectuosa constitueixen el cost total d'una peça.

El desenvolupament tecnològic ha tingut sempre com a objectiu aconseguir la màxima qualitat possible dels components així com el preu mes baix possible tant de la matèria prima com dels costos de mecanitzat.

Per reduir el cost de fresat i del mecanitzat en general s'ha actuat sota les bones pràctiques de manufactura, en els següents fronts:

- Aconseguir materials cada cop millor mecanitzables, materials que un cop mecanitzats en tou són endurits mitjançant tractaments tèrmics que milloren de forma molt sensible les seves prestacions mecàniques de duresa i resistència principalment
- Aconseguir eines de mecanitzat de millor qualitat que permetin augmentar de forma considerable les condicions tecnològiques del mecanitzat, tant la seva velocitat de tall com l'avanç de treball sense que es deteriorin els fils de tall de les eines.

- Construir fresadores més robustes, ràpides i precises que aconseguixin reduir sensiblement el temps de mecanitzat així com aconseguir peces de major qualitat i toleràncies més estretes.
- Ajustar els paràmetres de tall a valors òptims de productivitat, incloent moviments i talls d'entrada.

Per disminuir l'índex de peces defectuoses s'ha aconseguit automatitzar al màxim el treball de les fresadores, disminuint dràsticament el fresat manual, i construint fresadores automàtiques molt sofisticades o fresadores guiades per ordinador, que executin un mecanitzat d'acord a un programa establert prèviament com és el control numèric.

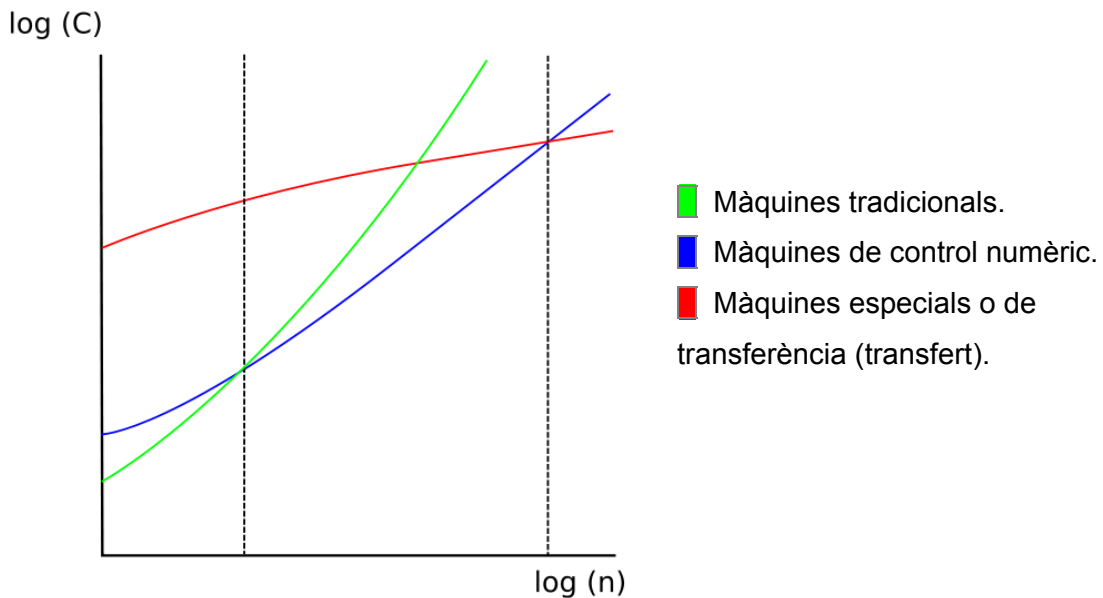


Figura 11: Cost Mecanitzat

En la Figura 11, es pot observar un gràfic aproximat en escala logarítmica del cost unitari de mecanització en funció del nombre de peces a mecanitzar per lot.

2.2. Estat de l'Art de la Robòtica

2.2.1. Cronologia

Tot i que inicialment els robots apareixen descrits de maneres utòpiques en novel·les i llibres de ciència ficció, cada cop més s'han anat incorporant als processos industrials i a la vida quotidiana.

1818-1942: Primers robots descrits en novel·les i jocs de ciència ficció (Frankenstein, RUR, Asimov, ...)

1945: Telemanipuladors usats per processament de productes nuclears

1948: Grey Walter (UK) construeix "robots tortuga" Elmer i Elsie

1956: Es crea Unimation, la primera empresa de robots industrials

1961: Primer robot en línies de producció de cotxes de la GM

1970: SRI Shakey

1975: Manipulador PUMA

1979: Stanford cart

1999: Sony AIBO

2000: Honda Asimo

2004: Arriben a Mars, el Spirit & Opportunity

2006-7: DARPA Challenge

En esdeveniments no molt futurs apareixeran:

- Robots amb capacitat d'aprenentatge
- Robots per assistir a persones discapacitades
- Robots recreatius i lúdics

2.2.2. Conceptes Generals

Un robot és per definició un sistema **mecatrònic** amb les següents característiques:

- una cadena cinemàtica
- un sistema dinàmic multicos amb vincles
- un sistema dotat d' accionaments i motors
- un sistema amb sensors de diversos generes
- un sistema que va controlat
- un sistema sobre el qual processa un software

En quan a la ciència i la tècnica de la robòtica, cal definir-la com una categoria multidisciplinària que contempla coneixements de:

- mecànica (estructures, cinemàtica, dinàmica...)
- electrònica (sensors, actuadors, control boards, ...)
- enginyeria elèctrica (motors, drivers, recursos de potència, ...)
- tecnologies d'informació (algoritmes, OS, AI, ...)
- control avançat
- comunicacions

En les recerques més avançades de la robòtica també es contempla:

- ciència de materials i nanotecnologia
- ciències cognitives, neurociències
- interfases home-màquina
- ergonomia, seguretat
- biomimesis

La robòtica és una tecnologia molt àmplia, que contempla moltes possibilitats. Es distingeixen dues categories en la robòtica:

- Robòtica **industrial**: es concentra en la **manipulació**
 - Sectors Tradicionals manufacturació: mecanitzats, handling, assemblatge, welding, packaging, pintat, encolat i deposicions selladores
 - Creixent difusió en sectors no tradicionals (agricultura, roba, indústria alimentària, muntatge de petits components, farmacèutica, etc.)

- Robòtica **mòbil i de serveis**: es concentra en la capacitat de **moviment autònom i en l' intel·ligència**
 - Vigilància, seguretat
 - Logística i neteja
 - Domèstica i assistència a persones
 - Serveis hospitalaris
 - Intervenció en desastres naturals
 - Exploració Espacial
 - Exploració marina
 - Reconeixements aeris

En el present estudi només es tractaran els robots industrials, ja que són els utilitzats en la producció i manipulació industrial, i específicament els robots antropomòrfics.

Entre les característiques que identifiquen a un robot trobem: volum de treball, el control de resolució, la exactitud i la repetibilitat.

Tots aquests conceptes s'analitzaran amb detall en el capítol de l'[estació experimental](#).

En quan als robots industrials, es poden distingir 3 clares evolucions, que venen determinades segons el grau de complexitat del robot. Aquestes evolucions són les següents:

2.2.2.1. Robots de primera generació

Dispositius que actuen com a "esclau" mecànic d'un home, qui proveeix mitjançant la seva intervenció directa, el control dels òrgans de moviment. Aquesta transmissió té lloc mitjançant servomecanismes actuats per les extremitats superiors de l'home, cas típic de manipulació de materials radioactius, obtenció de mostres submarines, etc.

2.2.2.2. Robots de segona generació

El dispositiu actua automàticament sense intervenció humana davant posicions fixes en les quals el treball ha estat preparat i ubicat de manera adequada executant moviments repetitius en el temps, que obeeixen a lògiques combinatòries, seqüencials, programadors pas a pas, pneumàtics o Controladors Lògics Programables. Un aspecte molt important està constituït per la facilitat de ràpida reprogramació que converteix a aquests Robots en unitats "versàtils" el camp d'aplicació del qual no només es troba en la manipulació de materials sinó en tot els processos de manufactura, com per exemple: a l'estampat fred i a cop calent, assistint a les màquines eina per a la càrrega i descàrrega de peces; a la injecció de termoplàstics i metalls no ferrosos, en els processos de soldadura a punt i continua en tasques de pintada; i reemplaçant amb avantatge algunes operacions de màquines convencionals.

2.2.2.3. Robots de tercera generació

Són dispositius que havent estat construïts per assolir determinats objectius seran capaços d'escollir la millor forma de fer-ho tenint en compte l'entorn que els rodeja. Per obtenir aquests resultats és necessari que el robot tingui algunes condicions que possibilitin la seva interacció amb l'ambient i els objectes.

Les mínimes aptituds requerides són: capacitat de reconèixer un element determinat en l'espai i la capacitat d'adoptar trajectòries pròpies per aconseguir l'objectiu desitjat.

Els mètodes d'identificació emprats fan referència a la imatge òptica per ser aquesta el llenguatge humà en l'observació dels objectes, tanmateix no pot assegurar-se que la que és natural per a l'home, constitueixi la millor solució per al robot. [T.1]

2.2.3. Cadena cinemàtica i tipus de robots

Alhora de definir els tipus de robots existents cal tenir clar que és una cadena cinemàtica. Una cadena cinemàtica es caracteritza pels següents elements:

- Una estructura multicòs composta de **braços** idealment rígids (dotats de massa i altres propietats dinàmiques), connectats entre ells per mitjà de
- **Juntes** ideals, que permeten el moviment relatiu entre dos braços successius. Aquestes juntes poden ser:
 - **Rotacionals (R)** permeten un moviment de rotació relatiu entre els braços.
 - **Prismàtiques (P)** permeten un moviment de translació relatiu entre els braços.
- Els **graus de moviment** indiquen la presència de juntes prismàtiques o rotacionals, tant actives com passives.
- Els **graus de llibertat** (gdl, en Anglès dof=degrees of freedom) indiquen el número de paràmetres lliures del conjunt manipulador.

Per obtenir una imatge visual del que és un robot s'il·lustra la Figura 12.

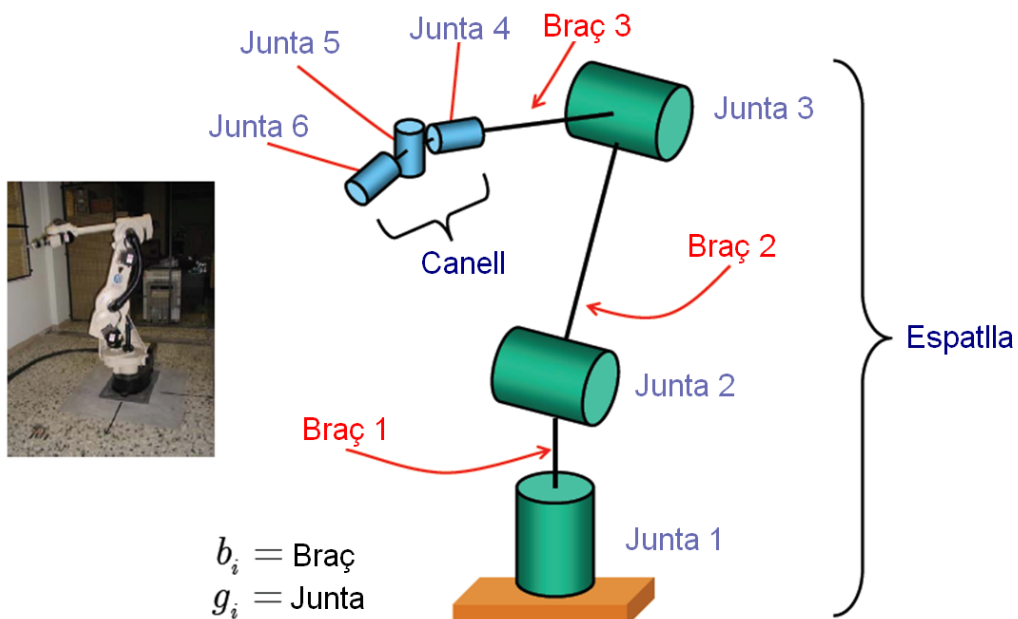


Figura 12: Nomenclatura Robot [A.4]

Tal com es pot apreciar, hi ha dos grans conjunts que conformen el robot, que són l'**espatlla** i el **canell**. Segons l'espatlla o el canell és defineixen diferents tipus de robots.

Tipus de robots segons la cadena cinemàtica de l'espatlla:

- Cartesià (3P)
- Cilíndric (2P-1R)
- Polar o esfèric (1P-2P)
- SCARA (1P-2R)
- Antropomòrfic o Articulat (3R)
- Estructura paral·lela

Tipus de robots segons la cadena Cinemàtica del canell:

- Canell **Eulerià** 3R

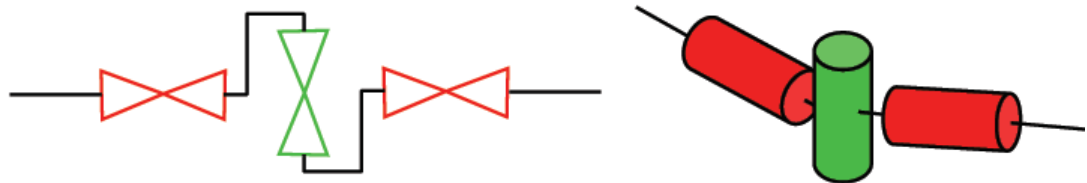


Figura 13: Canell Eulerià 2D i 3D [A.4]

- Canell **Roll-Pitch-Yaw** 3R

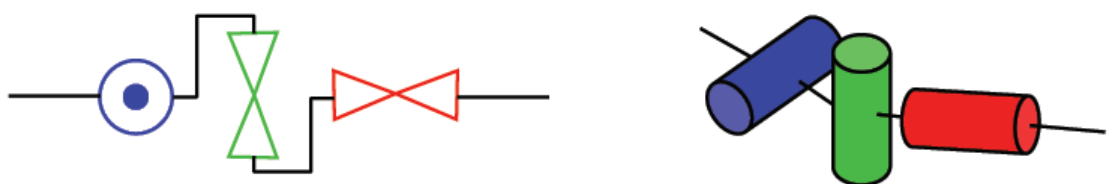


Figura 14: Canell Roll-Pitch-Yaw 2D i 3D [A.4]

Una característica que pot tenir el canell, és el canell esfèric, que vol dir que els tres eixos coincideixen en un sol punt, fet que garanteix una solució per a calcular la cinemàtica inversa. [A.4]

2.2.3.1. Cartesià

Posseeix tres moviments lineals, és a dir, té tres graus de llibertat, els quals corresponen als moviments localitzats en els eixos X, Y i Z.

Els moviments que realitza aquest robot entre un punt i un altre són amb base en interpolacions lineals. Interpolació, en aquest cas, significa el tipus de trajectòria que realitza el manipulador quan es desplaça entre un punt i un altre.

A la trajectòria realitzada en línia recta se li coneix com a interpolació lineal i a la trajectòria feta d'acord amb el tipus de moviments que tenen les seves articulacions se li diu interpolació per articulació.

A partir d'aquest tipus de robots van evolucionar les màquines de mecanitzar de control numèric de 3 eixos. Tot i ser una aplicació molt específica, la potent indústria de l'acer va fer que evolucionessin molt, fins assolir precisions en el moviment, extremadament bones.

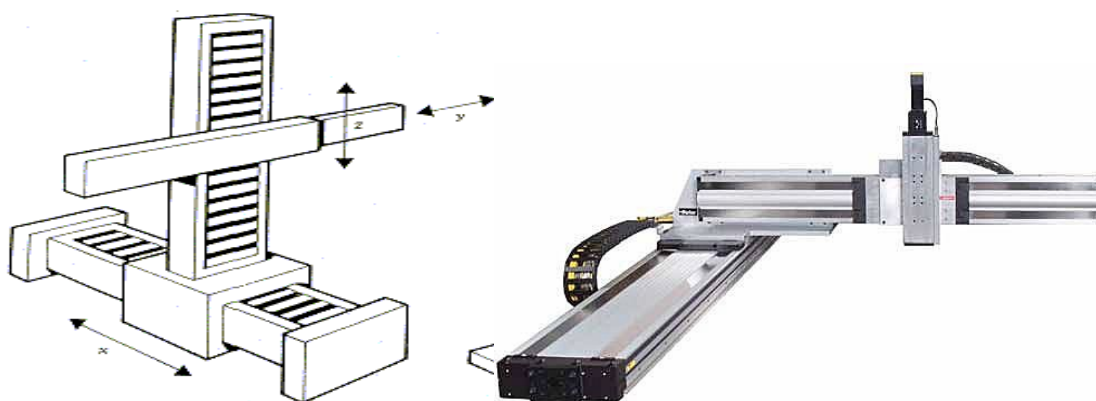


Figura 15: Robot Cartesià [W.4]

2.2.3.2. Cilíndric

Pot realitzar dos moviments lineals i un rotacional, és a dir, que presenta tres graus de llibertat.

El robot de configuració cilíndrica està dissenyat per executar els moviments coneguts com a interpolació lineal i interpolació per articulació.

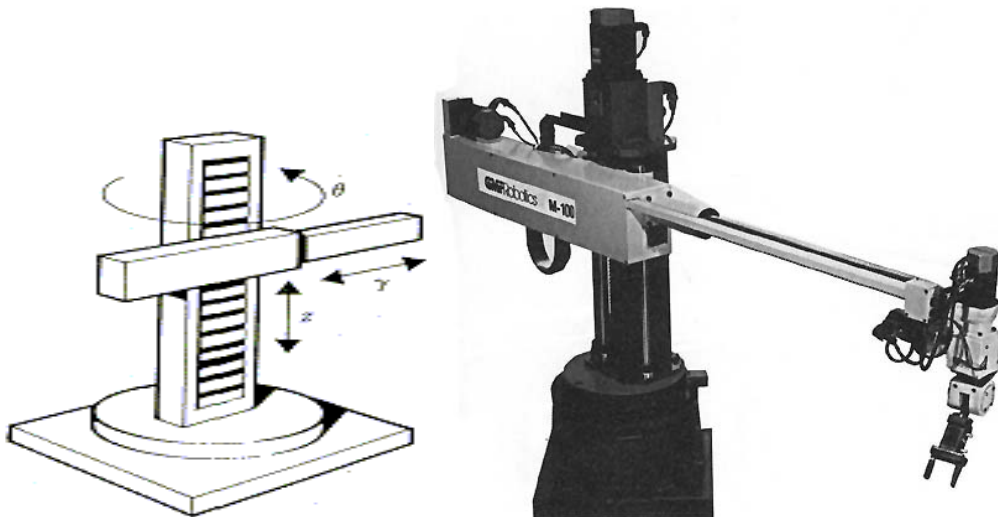


Figura 16: Robot cilíndric [W.5]

2.2.3.3. Polar o esfèric

Té diverses juntes. Cada una d'elles pot realitzar un moviment diferent: rotacional, angular i lineal.

Aquest robot utilitza la interpolació per articulació per moure's en les seves dues primeres articulacions i la interpolació lineal per a l'extensió i retracció.

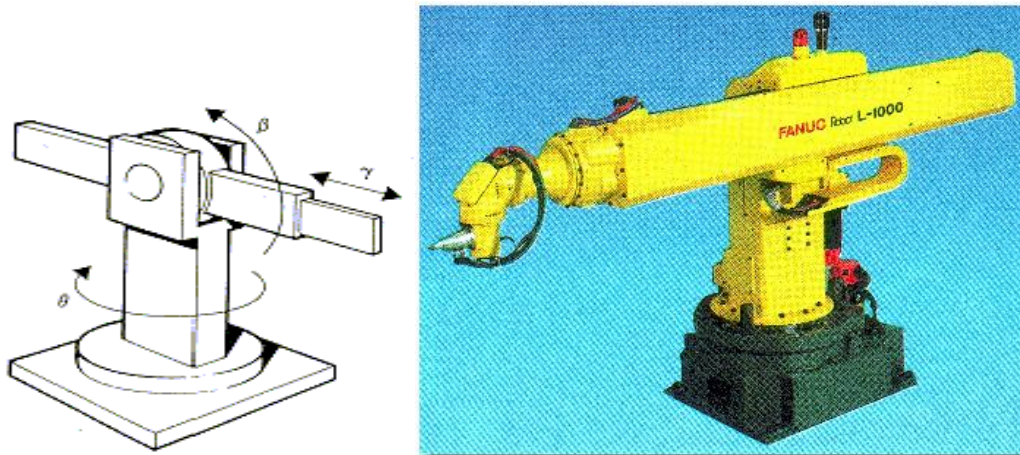


Figura 17: Robot Esfèric [A.6]

2.2.3.4. SCARA

El robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), és un exemple de robot amb una configuració no clàssica.

Aquest braç pot realitzar moviments horitzontals de major abast a causa de les seves dues articulacions rotacionals. El robot de configuració SCARA també pot fer un moviment lineal (mitjançant la seva tercera articulació).

Aquest robot va ser ideat per inserir els components elèctrics en circuits integrats, ja que al tenir dues juntes de rotació s'assoleixen velocitats de producció molt altes en elements petits.

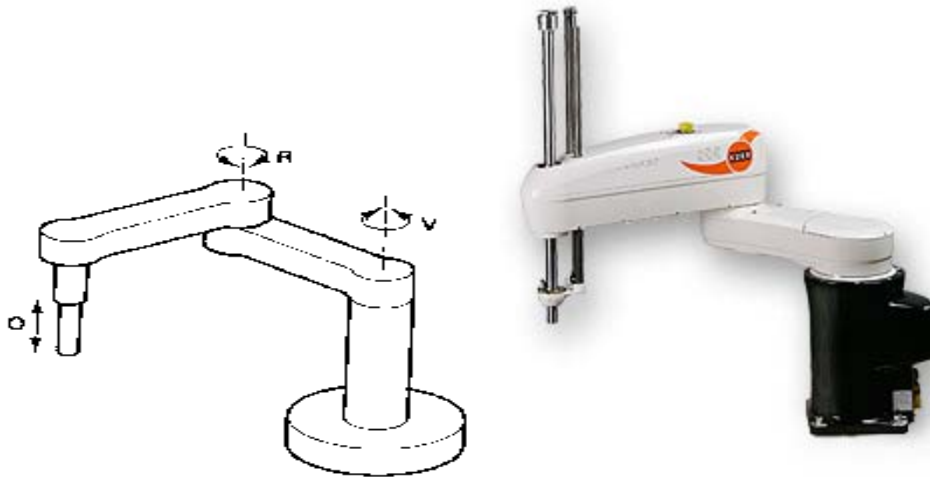


Figura 18: Robot SCARA [W.6]

2.2.3.5. Antropomòrfic o Articulat

És un robot on les tres primeres juntes són rotacionals. Pot realitzar moviments del TCP de forma lineal amb combinació de les rotacions de que disposa.

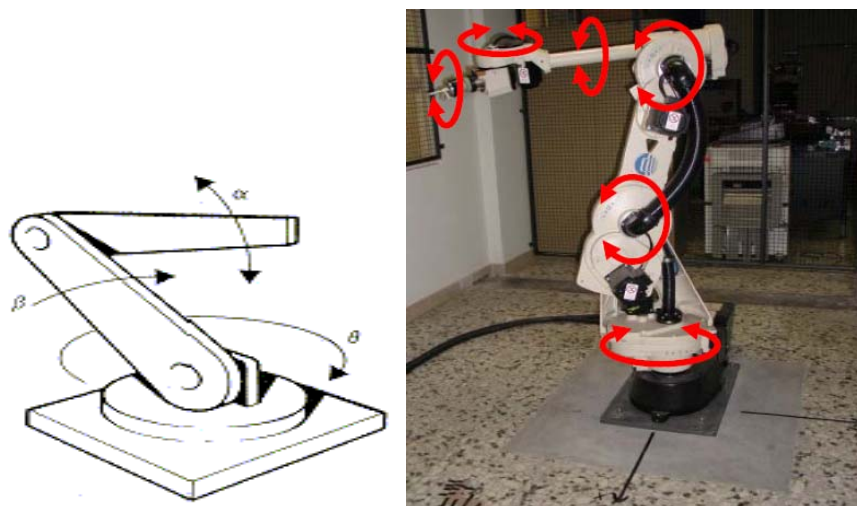


Figura 19: Robot Antropomòrfic [A.4]

2.2.3.6. Estructura paral·lela

Són robots no clàssics, dels quals la característica principal és que la cadena cinemàtica és tancada.

No hi ha cap nombre determinat de juntes, i s'utilitzen per aplicacions especials i no convencionals com són simuladors de vol o de Formula1®.



Figura 20: Robot d'Estructura Paral·lela

2.2.4. Trajectòria

Un cop definit el concepte de cadena cinemàtica, cal tenir present que l'objectiu del robots és realitzar una certa tasca.

Aquesta tasca sempre és la de col·locar un element en una certa posició, velocitat i/o força.

L'extrem del robot, i per tant de l'eina de treball (això és cert en el sistema europeu i americà, ja que el sistema de producció japonès es sol moure l'objecte a treballar en lloc de l'eina) conegut com a Tool Center Point (a partir d'ara TCP) cal saber la posició exacte d'on es troba.

Es coneix com Camí o Path el recorregut físic o punts geomètrics (de l'Espai de Treball o Task Space) per o passa el TCP, i com a Trajectòria o Trajectory, el Camí tenint en compte el temps requerit per dur-lo a terme.

Un cop es coneixen les posicions cartesianes del task space, caldrà conèixer les rotacions i desplaçaments de cada una de les juntes per tal que el TCP segueixi el camí desitjat. Aquest procés es coneix com a Cinemàtica Inversa, i és l'encarregat de passar de l'espai cartesià a l'espai de juntes o Joint Space.

S'ha de ser conscient que volem treballar en un espai cartesià, però que realment controlem les rotacions dels diversos motors. Aquest fet està exposat de forma gràfica en la Figura 21, on un robot de 6 graus de llibertat on el TCP ha de realitzar un camí (en vermell), però el que cal és gestionar la rotació de cada junta (en turquesa).

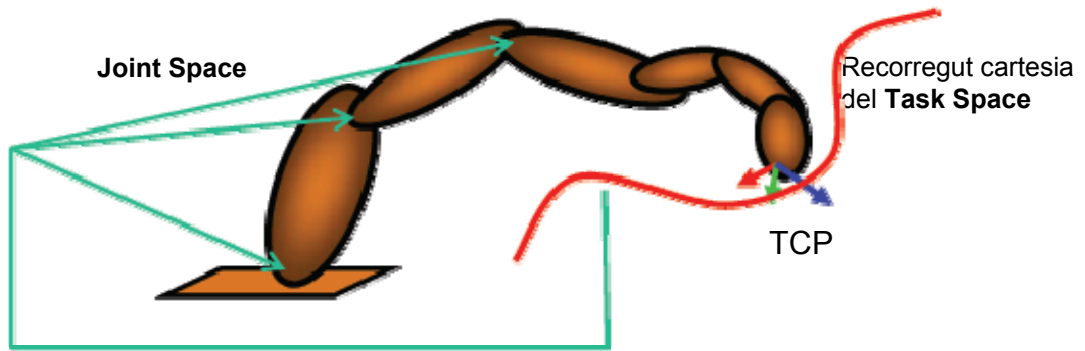
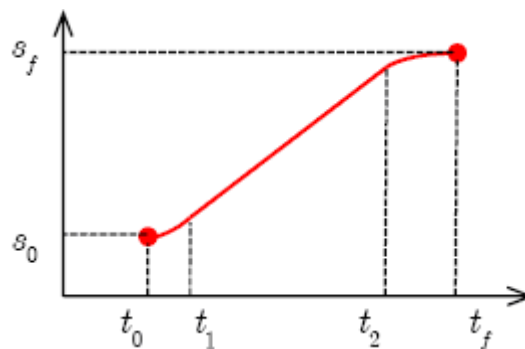


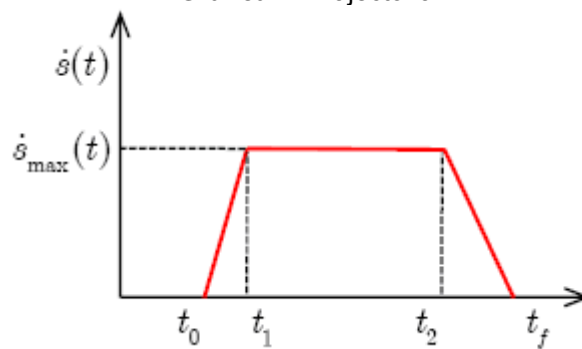
Figura 21: Esquema de Gestió del Task Space al Joint Space

En la planificació de la trajectòria, cal tenir en compte el termes de posició (s), velocitat (s') i acceleració (s'').

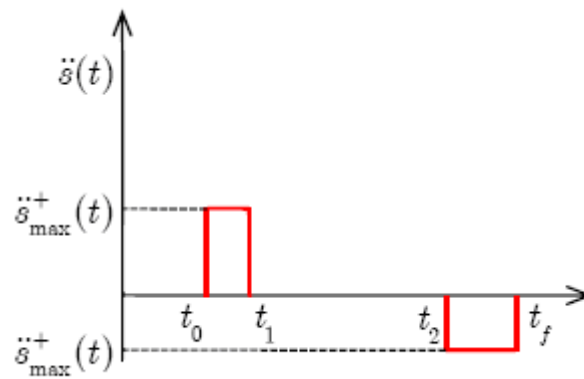
Fins ara existies robots amb trajectòries 2-1-2, és a dir que realitzaven trajectòries en forma d'equacions de $2n$ grau, $1r$ grau i $2n$ grau. Per facilitar l'interpretació es presenta el moviment en les següents gràfiques (Gràfica 1-Gràfica 2) de forma que s'analitza de la següent manera:



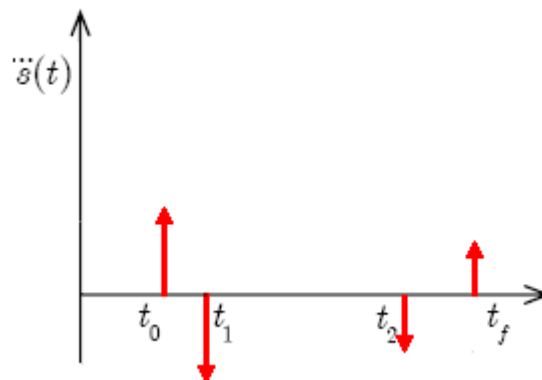
Gràfica 1: Trajectòria 2-1-2



Gràfica 2: Velocitat Trapezoïdal



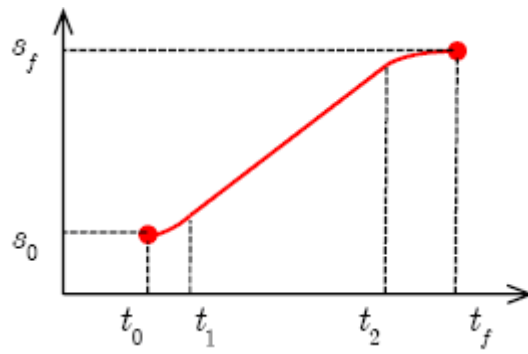
Gràfica 3: Acceleració Limitada



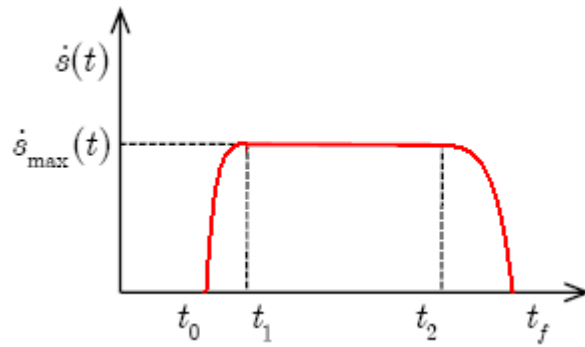
Gràfica 4: JERK de trajectòria 2-1-2

Actualment ja existeixen robots d'última generació (i també en les màquines de control numèric d'alta velocitat) que contempnen la JERK (derivada de l'acceleració) com un terme important, del qual no es pot produir en un instant diferencial, sinó que s'ha de produir durant un cert temps, és a dir una trajectòria 3-2-1-2-3 (trajectòries amb equacions de 3r grau), on la JERK resultant és tal com apareix a la Gràfica 8.

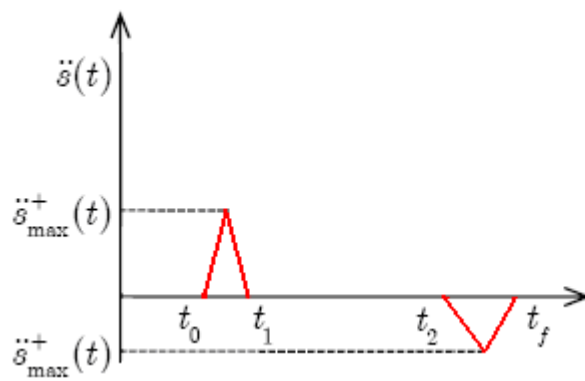
Això suavitza el moviment del TCP alhora que evita acceleracions brusques (sobrealceleracions o dumping), que impliquen pics de càrrega i mala definició del resultat. En trajectòries 2-1-2 apareixen problemes de vibracions, cimbregos, i cops. Això es degut que s'idealitza el robot com un conjunt d'elements completament rígids i sense cap joc a les juntes, però aquesta hipòtesis és incorrecta quan s'analitza les prestacions i possibilitats fins al detall més minuciós.



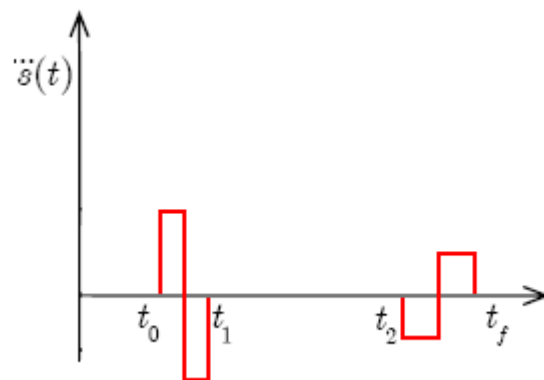
Gràfica 5: Trajectòria 3-2-1-2-3



Gràfica 6: Velocitat 2-1-2



Gràfica 7: Acceleració Limitada



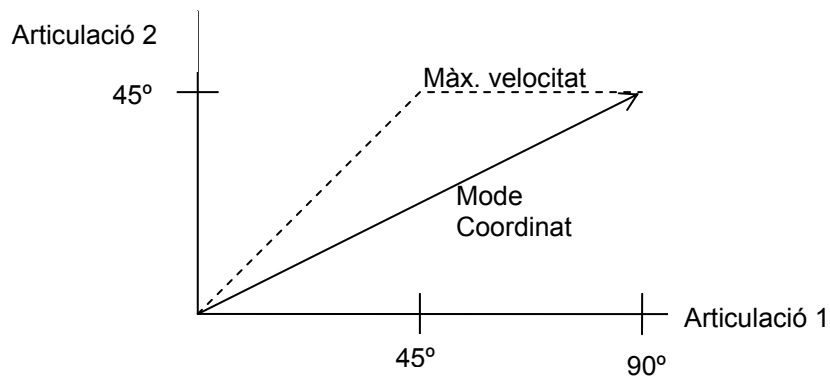
Gràfica 8: JERK de 1r Grau

En ambdós casos, trajectòries 2-1-2 i 3-2-1-2-3, l'acceleració està limitada a un valor que queda determinat per la potència dels motor i actuadors.

El Mode Coordinat significa que totes les juntes arribaran al punt final de la trajectòria en el mateix moment.

Això vol dir que tots els motor han d'estar coordinats, ja que venen condicionats per la junta que més tardarà (que serà la que anirà a la màxima velocitat), i la resta aniran més lentes (o igual) per tal d'arribar al punt, tardant el mateix temps.

Aquí es presenta un exemple on es vol moure el TCP d'un robot de 2 graus de moviment de la posició $q(t_0)=(0;0)$ fins a $q(t_f)=(q_1=90^\circ; q_2=45^\circ)$



Gràfica 9: Diferència entre Mode Coordinat i Mode de Màxima Velocitat

Actualment tots els robots industrials, incloent el utilitzat en l'estació experimental, utilitzen trajectòries en Mode Coordinat, ja que aquest fet garanteix un màxim rendiment energètic i durabilitat dels components.

2.2.5. Control

Per tal de dur a terme el control de la posició del TCP s'han desenvolupat diversos mètodes. Entre aquests hi ha dues categories principals:

- Control independent (control descentralitzat o control local)
- Control centralitzat

També cal dir que actualment tots els robots i màquines de precisió utilitzen motors pas a pas (steper motors), ja que garanteixen una major precisió i control.

Això es degut a que el motor pas a pas funciona de la següent manera, cada rotació o revolució esta dividida amb un nombre de passos (com més passos més precisió tindrà el motor i conseqüentment la màquina), llavors aplicant una senyal elèctrica en forma de graó, s'obté la rotació d'una divisió, i per cada senyal de graó que es doni, s'obtindrà igual nombre d'avançaments de divisions.

Per tant es controla al detall cada desplaçament angular.

La força màxima que tindrà qualsevol robot, està directament relacionada amb el moment màxim que permet de fer cada el motor, i per tant de transmetre a la corresponent junta.

Actualment s'utilitzen engranatges per tal d'augmentar el moment que pot fer cada motor, però no s'utilitza en tots els casos, de fet només ho solen portar les primeres juntes dels robots més grans, ja que són les juntes que més càrregues han de suportar.

2.2.5.1. Control Independent

Al **control independent** (també conegut com a **Local Controller**, **Decentralized Control** or **Independent Joint Control**) cada motor, és a dir cada junta, té el seu propi controlador local, que només té en compte les variables locals, és a dir, posició de la junta $\mathbf{q}_i(\mathbf{t})$ i la velocitat $\mathbf{q}_i'(\mathbf{t})$.

- El control és tipus SISO, basat en arquitectures P, PD o PID
- El controlador es dissenyat considerant només un model aproximat sobre la junta corresponent
- Aquest esquema és el més comú en els robots industrials, degut a la seva simplicitat, modularitat i robustesa.

L'esquema o diagrama de control és el següent (Figura 22), on s'aprecia la part de control de la computadora i la part estrictament del control del robot.

En el robot de l'estació d'estudi, aquest esquema està detallat a la part de [l'estació experimental](#), on s'exposa cada terme.

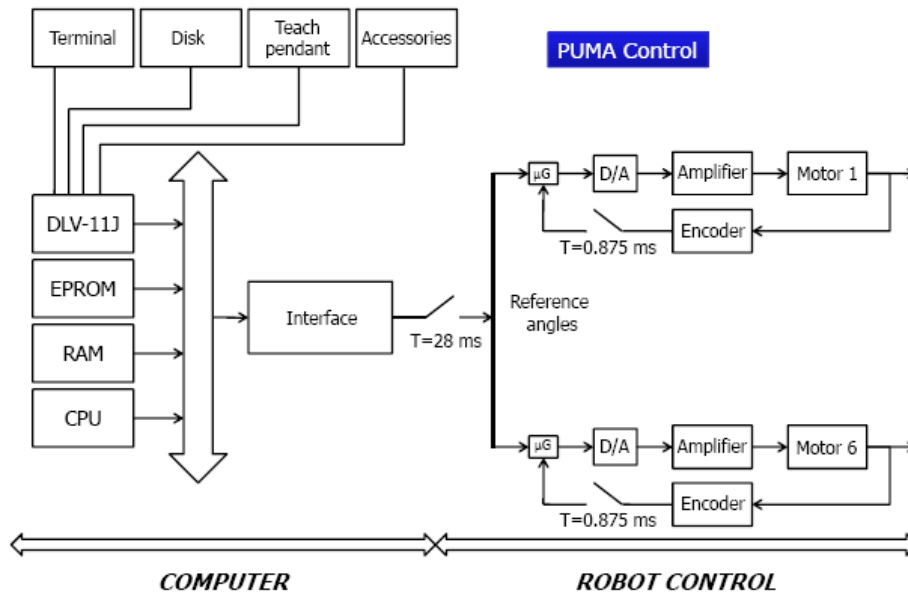


Figura 22: Control Descentralitzat 1 [A.4]

Per tal d'obtenir una imatge més gràfica de com funciona tot el conjunt, s'ha inserit la Figura 23, on s'aprecia el procés que es segueix per tal de fer treballar un robot.

1. Dissenyem els recorreguts que volem planificar (Path Planner) en un espai de coordenades cartesianes (task space).
2. Per **cinemàtica inversa** passem tots els punts cartesianes a rotacions de cada junta, és a dir en un **joint space**.
3. Amb cada una de les dades de rotació de les juntes, la traspassem al corresponent controlador local.
4. Del controlador local s'obté la senyal de rotació, que s'amplifica per tal que el motor pas a pas rebi suficient energia per tal de poder treballar.
5. El motor que controla cada junta rota.
6. Es verifica la rotació del motor.

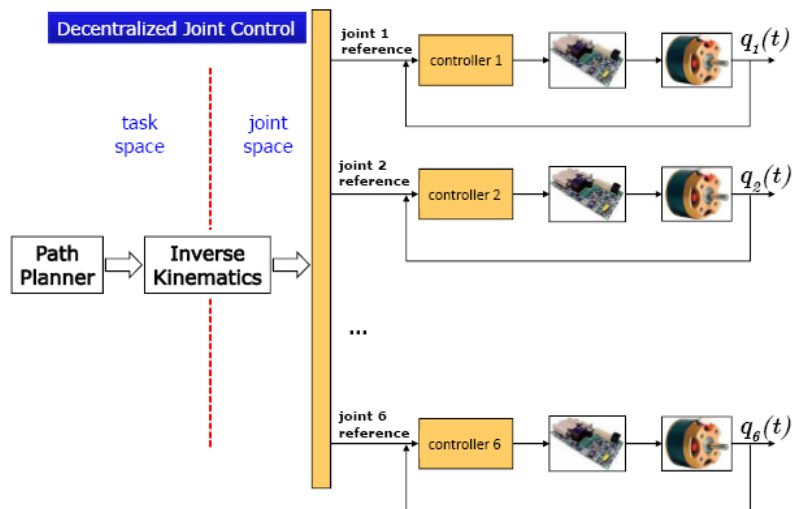


Figura 23: Control Descentralitzat 2 [A.4]

2.2.5.2. Control Centralitzat

Només té un sol controlador MIMO que genera el vector comandament per als motors de les juntes; està basat en el model complet del manipulador, i pren en compte el vector complet de dades sobre posicions $q(t)$ i velocitats $q'(t)$

Tant si es tracta de control local o centralitzat poden existir diverses variants. Aquestes variants són verificadors de posició, ja siguin verificadors per càmeres òptiques, traçadors laser (tracking laser), o altres sistemes.

2.2.6. Empreses de Robots Antropomòrfics

Entre les empreses que fabriquen robots antropomòrfics per a la producció industrial, destàquen:

- ABB ROBOTICS (Suècia)
- KUKA ROBOTER (Alemanya)
- FANUC ROBOTICS (Japó)
- COMAU (Itàlia)
- PANASONIC (MIECO)
- KAWASAKI ROBOTICS (Japó)

- MOTOMAN (Japó - Estats Units d'Amèrica)
- NACHI FUJIKOSHI (Japó)
- NACHI ROBOTICS (Japó)
- SYNETICS (Japó)
- STÄUBLI (Suïssa)
- OTC-DAIHEN (Estats Units d'Amèrica)

El robot de l'estació experimental del Centre Tecnològic Ascamm és de la firma ABB. Això es degut a un conveni de desenvolupament i recerca tecnològica entre el centre i l'empresa constructora de robots.

3. ESTACIÓ EXPERIMENTAL

L'estació experimental que s'ha desenvolupat per a dur a terme aquest estudi, ha estat realitzada en el [Centre Tecnològic Ascamm](#), al Parc Tecnològic del Vallès, ubicat a Cerdanyola del Vallès.

L'estació pilot es troba en el departament de d'I+D+I, en la *Unitat d'Equips, Automatitzacions i Mecatrònica* dirigida per l'enginyer Jordi Ribatallada.

L'estació experimental, Figura 24, compta amb els següents elements:

1. Robot
2. Mandrí
3. Controlador Robot
4. Controlador Mandrí
5. Plat divisor i Mordassa
6. Ordinador

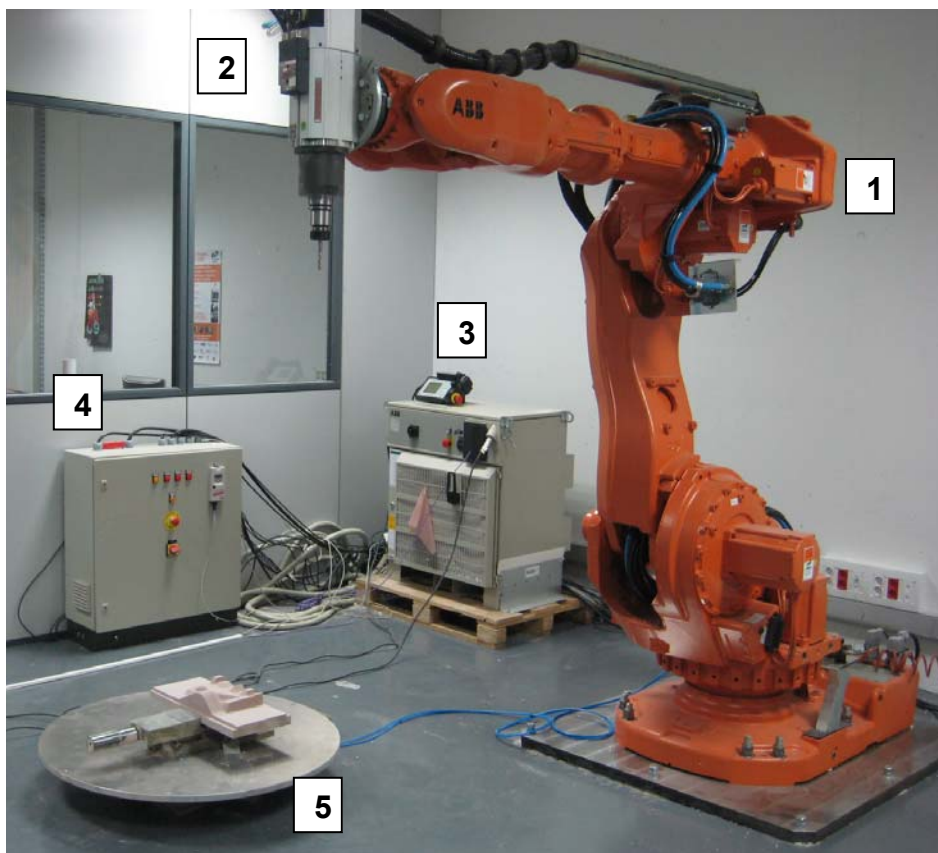


Figura 24: Estació Experimental

L'objectiu d'aquesta tecnologia, i per tant de la present estació, és crear peces de 3D de grans dimensions a partir d'arxius CAD.

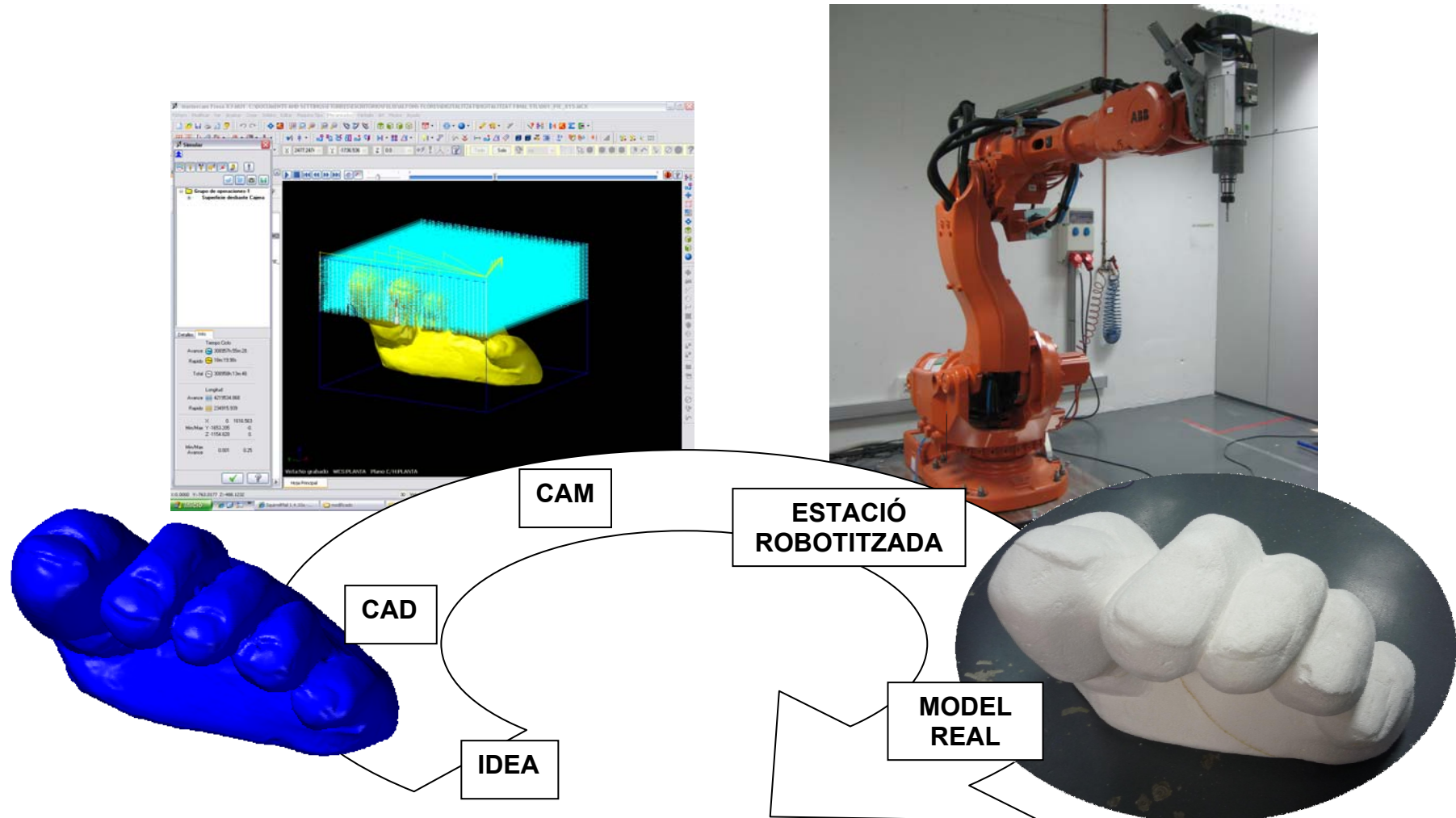


Figura 25: Funcionament de l'Estació Experimental, i la Tecnologia Utilitzada

La gestió dels elements és realitzada tal com apareix a la Figura 26.

El control de tots els sistemes la realitza un sol operari, en aquest cas l'autor del present treball, que alhora fa de programador de les trajectòries. L'operari per mitjà d'un programa de mecanitzat en un ordinador (en aquest cas el programa MasterCam) dissenya les trajectòries del procés de mecanitzat, tal com ho faria en una màquina tradicional de Control Numèric o un centre de mecanitzat (CNC). Al software de mecanitzat MasterCam, se li ha instal·lat un mòdul de traducció, ja que el llenguatge de programació del robot és un llenguatge específic de la marca ABB (anomenat RAPID).

L'operari envia el programa traduït en RAPID de l'ordinador al controlador del robot, de forma que es carrega en el seu sistema operatiu. La interfície que s'utilitza entre l'operari i el controlador és el FlexPendant, una pantalla tàctil on l'operari controla el sistema operatiu (set-up, programes en execució, i resta de processos). Així mateix pel FlexPendant podem controlar les entrades i sortides. Una de les sortides programades és el control del mandrí de forma que per mitjà del FlexPendant podem executar el programa dissenyat, i alhora encendre i apagar el mandrí.

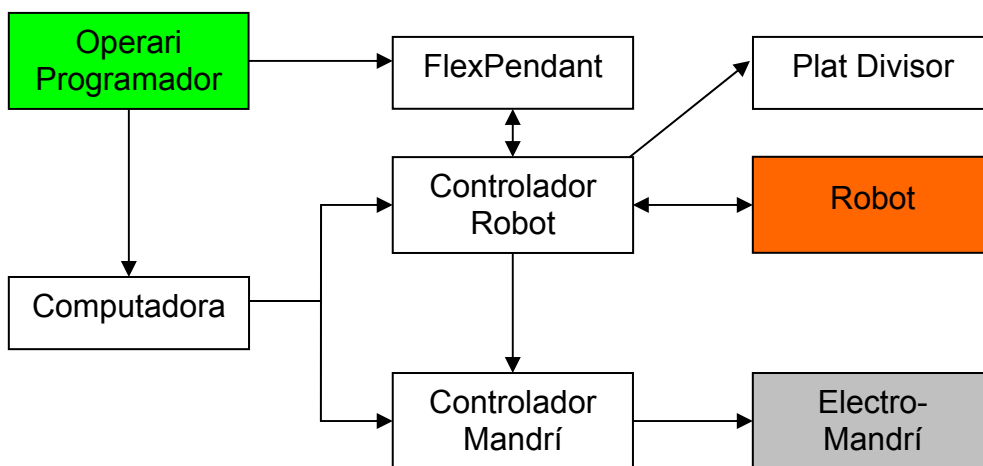


Figura 26: Gestió del Control de l'Estació Experimental

En el capítol d'integració de sistemes es descriu l'esquema de la Figura 26 en detall.

3.1. Elements de Màquines

En aquest capítol s'exposen totes les màquines que integren l'estació experimental.

3.1.1. Robot

El robot utilitzat ha estat un IRC 6640, de l'empresa ABB.

Aquest model és una evolució de l'antic model IRC 6600 del qual s'han realitzat diverses millores, la més destacable un alleugeriment de la massa en 400kg, un augment de la precisió i la velocitat.



Figura 27: Robot IRC6640

3.1.2. Controladora del Robot

El model escollit és el IRC5 de la marca ABB. Aquest model compta amb moltes qualitats, exposades més endavant, però ara primerament s'exposarà el funcionament d'aquest sistema.



Figura 28: Controlador del Robot ABB IRC5 [W.20]

El controlador IRC5 és cor de la cel·la del robot, optimitza tots els moviments del robot i altres eixos externs.

Els armaris de mòduls de control de IRC5 integren una CPU, font d'alimentació, ports de serveis, plafó d'operador, interfície de seguretat, connexions personalitzables i de FlexPendant. El mòdul de control inclou espai per a equip personalitzables pels clients, dos canals d'Ethernet, un per a LAN i un per a la connexió local. IRC5 també té dos canals en sèrie per a la comunicació punt a punt amb sensors, unitats d'I/O, ordinadors, un altre equip de producció, terminals i impressores. [font ABB]

Tots aquests sistemes els controla l'operari per la interfície del FlexPendant. Aquest model del **FlexPendant** es caracteritza per la seva claredat, el disseny ergonòmic, per



Figura 29: FlexPendant [W.20]

una pantalla tàctil a color, i un joystick de 3 Dimensions per una interacció intuïtiva. Des de aquesta interfície l'operari és capaç de gestionar totes les funcions del controlador.

L'operari carrega el programa que prèviament a dissenyat, llavors ja el pot executar en el robot. En l'execució el processador llegeix el programa RAPID, i realitza la cinemàtica inversa, de forma i manera que ho transforma en coordenades del **Joint Space**. Aquestes dades es transmeten al controlador del robot. El controlador d'aquest robot és de **juntes independents o locals**.

Cal especificar les entrades i sortides digitals del sistema, aquestes estan exposades a la Taula 2 i a la Taula 3. Com ja s'ha dit aquest armari és sistema central a cor de l'estació, i des d'aquí es controlen els sistemes principals i auxiliars. Totes les sortides del controlador s'accionen des del **FlexPendant**.

Entrada nº	Definició
1	Senyal de velocitat assolida
2	DT. Velocitat "0"
3	Eina enganxada
4	Eina expulsada

Taula 2: Entrades del Controlador

Sortida nº	Definició
1	Habilitació convertidor de freqüència
2	Marxa endavant convertidor de freqüència
3	Bloqueig i apertura con
4	Plat divisor

Taula 3: Sortides del Controlador

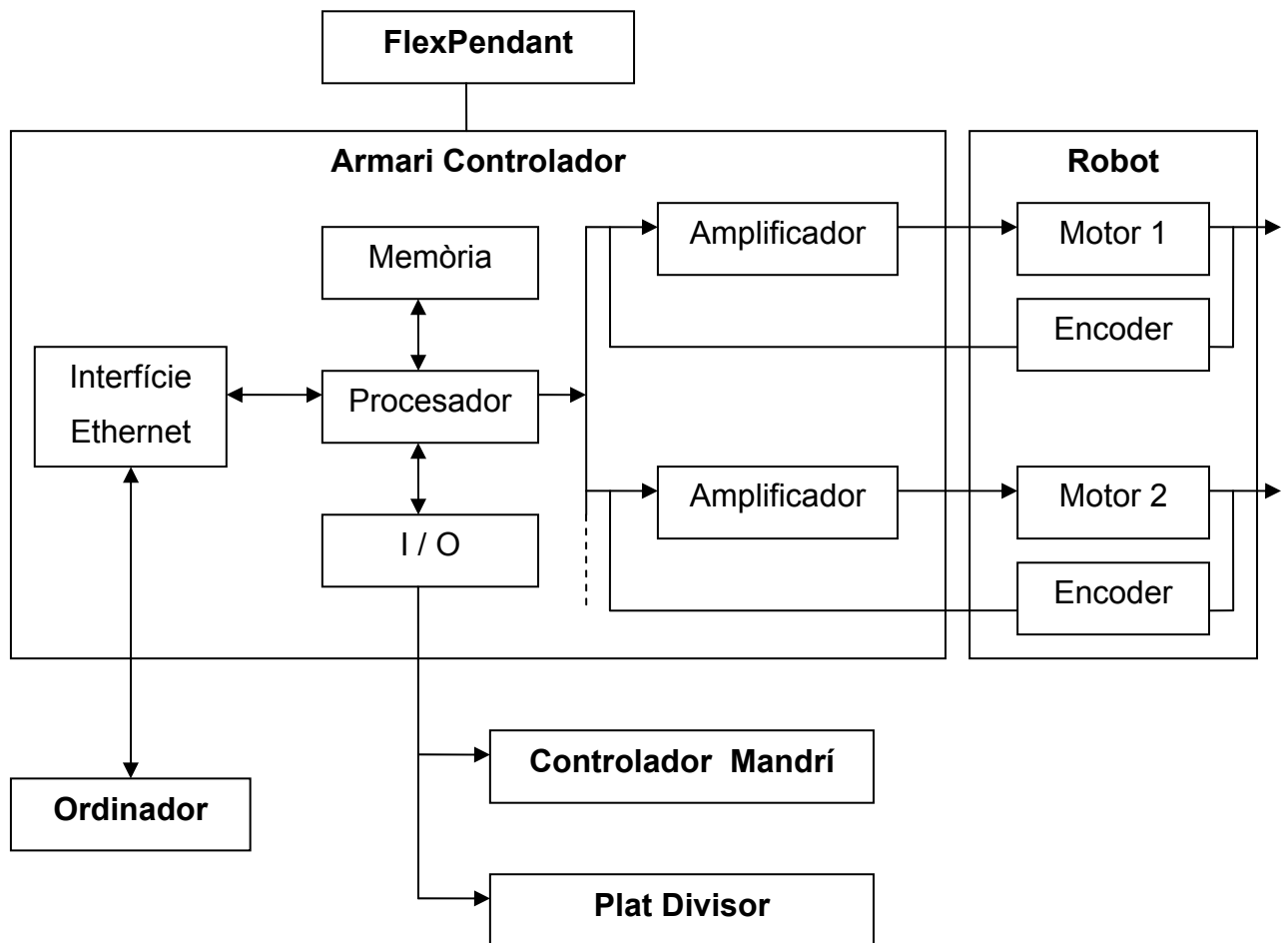


Figura 30: Control del Robot

En quan a les característiques de l'armari controlador podem destacar les següents:

Control de moviment

Basat en un model dinàmic avançat, el IRC5 optimitza el rendiment del robot pel temps de cicle possible, trobant la solució físicament més curta (QuickMove) i la precisió de trajectòria més acurada (TrueMove).

Juntament amb un **camí independent de velocitat**, previsible i el comportament de *highperformance* es reparteix automàticament, sense intervenció del programador. Tot i que hi ha molt de secretisme industrial en aquestes tecnologies incorporen algorismes molt complexes, tal com apareix en l'estat de l'art de la robòtica.

Seguretat

La seguretat de l'operari és una de les principals qualitats del IRC5, complint totes les regulacions pertinents amb escreix. Els interruptors de posició electrònics són elements de la nova generació de seguretat, reemplaçant solucions electromecàniques

anteriors, obrint-se per a la cel·la flexible i robusta a la qual es connecta. Per a fins i tot més conceptes de seguretat de cel·les flexibles, p. ex. col·laboració que implica entre robot i operador, SafeMove ofereix un ventall de funcions de seguretat.

Modularitat

El IRC5 presenta diferents variants per proporcionar una solució entre cost i efectivitat per cada una de les necessitats. L'habilitat per apilar mòduls l'un sobre l'altre, posar-los costat a costat o bé distribuir-les en la cel·la permet una optimització de la distribució en planta (Lay-out) de l'estació de treball del robot. Existeix una versió muntada en un tauler, sense armari, que permet l'integració en qualsevol encapsulació per a una compacitat excepcional o per a requisits d'un entorn especials.

Llenguatge de Programació RÀPID

Proporciona la combinació perfecta de simplicitat, flexibilitat i robustesa. RÀPID és un llenguatge veritablement il·limitat amb suport per a programes ben estructurats i avançats. També incorpora suport potent per a moltes aplicacions de processos.

Comunicació

El IRC5 dóna suport als bussos per a I/O més modernes i és un nòdul eficient per a qualsevol xarxa de treball. La funcionalitat d'interfície de sensors, l'accés de discs remot i missatgeria de rels són exemples dels molts trets de connexió de xarxes potents.

Servei Remot

El control remot del robot està disponible a través de xarxes de comunicacions estàndards (GSM o Ethernet). Els mètodes de diagnosi avançats permeten investigació ràpida sobre fallada així com control de la condició de robots per tot el cicle de vida. Els paquets de servei estan disponibles, incloent-hi serveis nous com gestió de copia de seguretat, informació i activitats de manteniment proactives.

MultiMove

A través de MultiMove, el IRC5 pot controlar fins quatre robots des d'un sol controlador, amb un mòdul d'empenta (amplificació) compacte afegit per a cada robot addicional. MultiMove obre prèviament operacions impensables, gràcies a la coordinació perfecta de patrons de moviment complexos. Amb l'ajuda de RobotStudio, tals programes complexos es poden crear amb tan sols tocar un botó. [font ABB]

3.1.3. Electro-mandrí

El **mandrí** escollit és un model *ES919 NL HSK* de la marca italiana *HSD*.

Un mandrí és un potent motor elèctric. Aquest motor esta preparat per suportar condicions extremes en quan a càrregues mecàniques.

Aquest motor compta amb un sistema pneumàtic de fixació d'eines. Aquest sistema és compatible amb els sistemes de fixació dels Centres de Mecanitzat moderns i Freses tradicionals.

Les característiques tècniques del mandrí es presenten a laTaula 4.



Figura 31: Mandrí Muntat al Robot

Característica	Prestacions
Potència	7,5 kW (10CV)
Amperatge	20 A
Característica	Prestacions
Voltatge	380 V
Cos φ	0,8
Pols	4
Fricció interna (η)	0,85
Revolucions Màximes	24000 rpm
Revolucions Mínimes	1500 rpm
Desviació radial màx.	0,015 mm
Fixació d'Eines	HSK F63 (DIN 69893-6)

Taula 4: Prestacions del Mandrí

3.1.4. Controlador del Mandrí

El **controlador del mandrí**  s de la marca *KEB COMBIVERT*, i compta amb dos accessoris, els models són *Combivis5* i *CPmode*.

El controlador del mandrí és un sistema que aporta la potència necessària per tal que el mandrí tingui suficient energia com per tal de poder treballar.



Figura 32: Armari Controlador del Mandrí

El sistema compta amb una interfície que es connecta al computador i d'on rep la senyal de les revolucions ha que s'ha de posar. En l'ordinador hi ha un programa de control, dissenyat especialment per aquests tipus de mandrins, on s'introdueixen un valor de freq ncia, segons la Taula 5, llavors un convertidor digital/analògic converteix el senyal digital provinent del computador en un senyal analògic, que és amplificat fins un alt amperatge, i enviat fins al motor del mandrí.

Freq�ncia (computador) [Hz]	Revolucions (Motor) [rpm]
800	24000
700	21000

Freqüència (computador) [Hz]	Revolucions (Motor) [rpm]
650	19500
600	18000
550	16500
500	15000
450	13500
400	12000
350	10500
250	7500
200	6000
100	3000
50	1500

Taula 5: Gestió de les Revolucions del Mandrí

Aquest armari també compta amb un PLC que rep una senyal d'entrada provinent del controlador del robot, i té com a sortides tots els perifèrics que controla el armari controlador del robot.

Aquest PLC també compta amb el relé que acciona i apaga el mandrí.

L'armari també compta amb les seves pròpies mesures de seguretat, com parada d'emergència, i boto per la confirmació de posta en marxa.

3.1.5. Ordinador

L'**ordinador** és un Dell, model Precision T7400 de configuració pròpia.

És important dir que l'ordinador no és el centre de l'estació, l'ordinador només serveix per programar les trajectòries dels programes de mecanitzat i per verificar off-line el conjunt dels moviments.



Figura 33: Computadora

Les característiques d'aquest ordinador són les nombrades a la Taula 6.

Element	Quantitat	Prestacions
Processador	x8	2.5 GHz
Memoria RAM	x4	3 GB
Disc Dur	x4	80 GB

Taula 6: Prestacions de l'Ordinador

S'han utilitzat programes específics per a dur a terme les tasques de programació i gestió de l'estació, aquest programes estan exposats amb detall al capítol d'[Elements de Càlcul](#). Aquests software són:

- MasterCam
- RobotMaster
- RobotStudio

3.1.6. Plat Divisor

El **plat divisor** ha estat creat específicament per aquesta estació, de forma que no és d'una marca concreta.

S'anomena plat divisor o plat rotatori, a una superfície rectificada la qual la podem rotar. Cada volta d'aquest plat té unes divisions concretes, en el cas d'estudi 8, i per tant la podem rotar de 45 en 45°.

El control de les rotacions es realitza des del Controlador del Robot, i es pot girar positivament o negativa. L'energia necessària per a la rotació es realitzada per un pistó pneumàtic, per tant farà falta proveir al plat divisor de potència pneumàtica (a totes les plantes o fabriques industrials hi ha instal·lació pneumàtica)



Figura 34: Plat divisor i Mordassa

També es disposa d'un accessori per a subjectar al mecanitzar peces petites. Aquest accessori és una **mordassa**, de la marca *Criceliqui Hermanos SA* i model *H8-420*, i s'ha utilitzat en l'estació experimental per subjectar la pasta màster, l'alumini, i les peces petites de fusta i de Porexpan. En quan a les peces i models grans, és a dir de més de 50 cm, s'utilitzaven altres mètodes de fixació, com ara cinta encolada de doble cara.

3.1.7. Porta Eines

El porta eines és de la marca Laip. És un anclatge estàndard HSK, de manera que per un costat s'encaixa amb el mandrí i per l'altre costat amb l'eina, de forma que com hi ha eines de diàmetres diferents, es requereixen diferents portaeines que respectin aquets diàmetres diversos, Taula 7. L'anclatge del porta eines és pneumàtic, té una forma cònica que és pres per dit sistema pneumàtic.

Portaeines	Diàmetre Eina [mm]
1	10
2	12
3	20
4	20

Taula 7: Dimensions Portaeines



Figura 35: Porta-eines

3.2. Elements Consumibles

S'ha determinat com a material consumible de l'estació experimental només les **eines de tall**.

3.2.1. Eines

S'ha utilitzar diverses eines per tal de dur a terme les tasques de fresat, totes elles del tipus helicoidals, excepte 3 que són de creació pròpia (Figura 36). Tot hi que les eines de creació pròpia són molt interessants, no s'exposen en la present memòria en detall, ja que no s'han utilitzat en la realització dels experiments. Les característiques tècniques de totes les eines estan exposades a la Taula 8.

Marca	Model	Diàmetre	Longitud tall	Nº de fils	Punta
IZAR	HSS-E/CO8 12c	12	55	4	Plana
IZAR	HSS-E/CO8 20s	20	105	4	Esfèrica
IZAR	HSS-E/CO8 8s	8	20	2	Esfèrica
IZAR	HSS-E/CO8 15s	15	34	2	Esfèrica
FETTE	KHSS-E933	32	106	6	Tòrica
FETTE	E-25278	40	106	4	Tòrica
CLARKSON	280.924	50	65	6	Plana
NACHI	HSS-Co 14	14	55	2	Esfèrica
GARANT	STG6555HSS-CO8	12	30	2	Esfèrica
MISHUBISHI	VC-MDR8	10	40	2	Plana
MISHUBISHI	VC-MDR8	5	12	6	Plana
KOBELCO	KHA F9	12	20	2	Plana
Construcció	Propia	50	200	-	Esfèrica
Construcció	Propia	20	200	-	Esfèrica
Construcció	Propia	20	500	-	Esfèrica

Taula 8: Eines de Tall



Figura 36: Eines de Tall

3.3. Elements de Càlcul

Per tal d'estudiar i gestionar l'estació experimental s'ha utilitzat diversos programes per ordinador, però també s'ha realitzat càlculs tècnics de forma manual. Aquestes eines de càlcul són les següents:

- Càlculs H-D
- MasterCam
- RobotMaster
- RobotStudio

3.3.1. Danavit- Hartenberg i Matriu Homogènia

En aquest capítol es realitzen els càlculs tècnic del comportament cinemàtic del robot de forma manual, tot i que per resoldre els càlculs matemàtics s'utilitza el suport de software matemàtic MatLab®.

Els coneixement necessaris per realitzar aquest tipus d'estudi, hom ho ha après a la assignatura de ROBOTICA, que hom va realitzar al Politecnico di Torino en conveni d'intercanvi el quadrimestre de Tardor el curs 2008-2009. El professor d'aquesta assignatura era el Doctor en Informàtica Avançada i Robòtica, Basilio Bona.

El **protocol** per tal de realitzar els càlculs és el següent:

1. Individualitzar braços i juntes
2. Caracteritzar amb referències
3. Caracteritzar la referència de base i punta
4. Aplicar conveni DH; definir els paràmetres geomètrics; definir els paràmetres juntes
5. Calcular la transformació homogènia base-punta
6. Obtenir la cinemàtica directa posició
7. Cinemàtica inversa posició
8. Cinemàtica directa velocitat: aproximació analítica o geomètrica
9. Cinemàtica inversa velocitat: problema de la singularitat cinemàtica

1. Individualitzar braços i juntes

Primer de tot cal saber de quins cossos i juntes consta el Robot d'estudi. En la es presenten totes les juntes, marcades amb un lletra, i també apareix els possibles moviments que són capaces de realitzar. Cal comentar que totes les juntes, i per tant tots els possibles moviments relatius de cossos, són rotacionals.

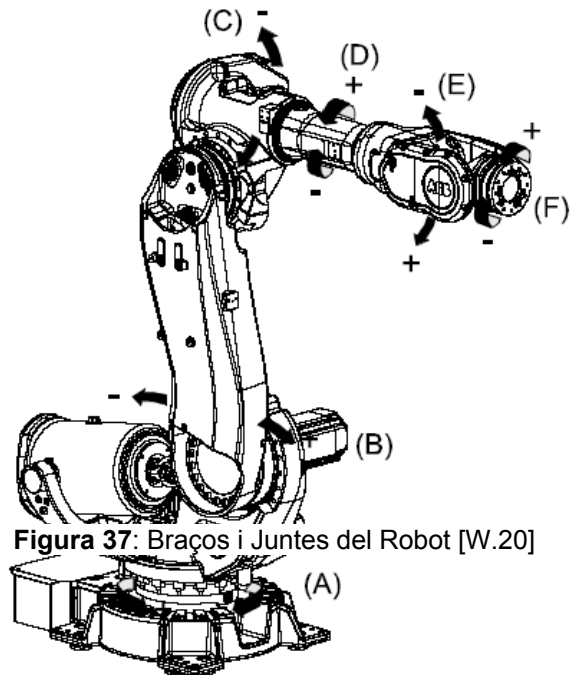


Figura 37: Braços i Juntes del Robot [W.20]

2. Caracteritzar amb referències

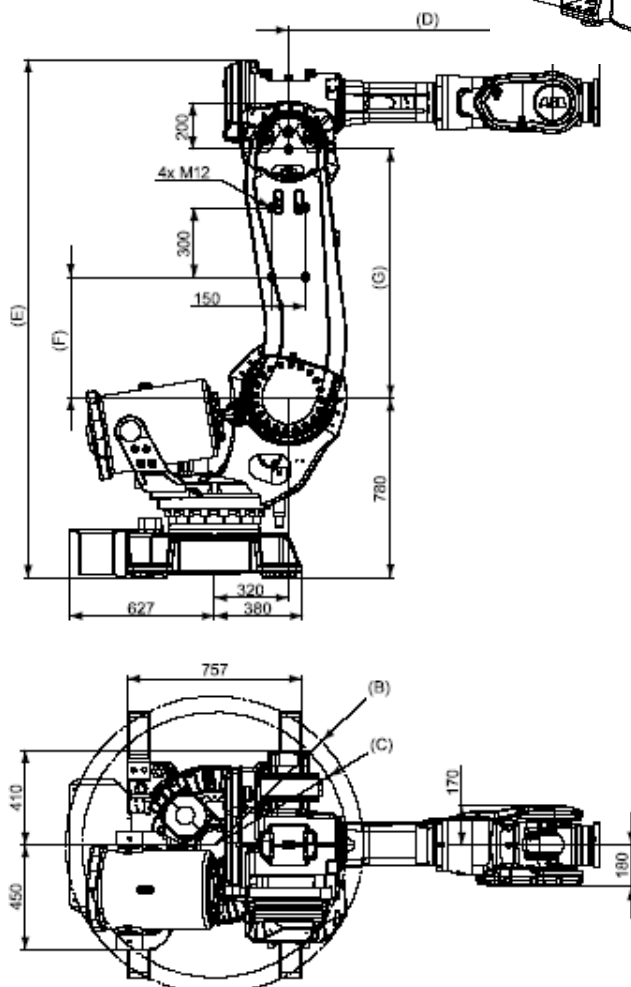


Figura 38: Cotes del Robot [W.20]

En la Figura 38 es presenten les cotes dimensionals dels braços i les juntes s'han obtingut de les especificacions tècniques del Robot (datasheet). Aquestes datasheets estan a l'annex A.1.

3. Caracteritzar la referència de base i punta

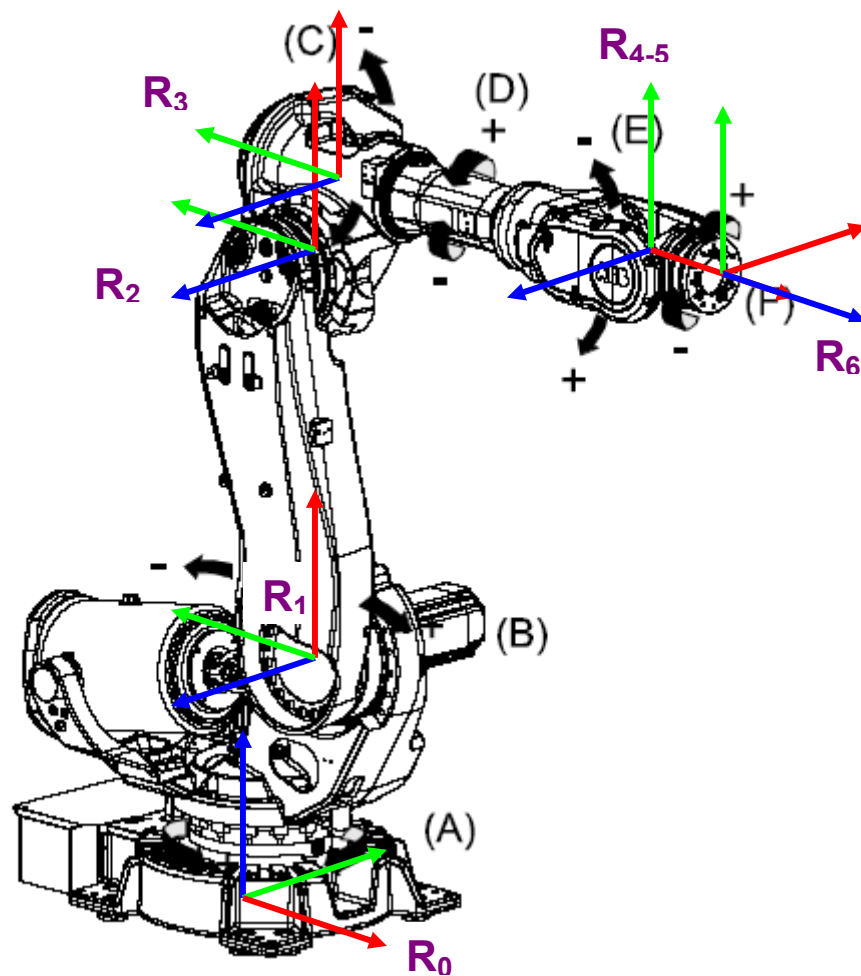


Figura 39: Bases de Referència en els Braços dels Robot [W.20]

És necessari definir les bases que s'utilitzaran per caracteritzar el robot. Aquestes bases es situen en l'extrem de cada braç.

La base, R_0 , és solidaria al Terra, per tant sempre és fixa.

L'extrem del Robot, i si no té cap eina acoblada també és el TCP, el sistema de coordenades d'aquest punt és R_6 . En el pas 5 d'aquest exercici es defineix la posició i orientació exacte d'aquesta última referència.

4. Aplicar conveni DH; definir els paràmetres geomètrics; definir els paràmetres juntes

El conveni **Danavit- Hartenberg**, és un mètode que permet de parametritzar els valors de la cadena cinemàtica. És un mètode que determina el protocol per tal de simplificar els càlculs de roto-translació que es produeixen en la cadena cinemàtica del robot, començant per la base empotrada al terra fins arribar a l'extrem final del braç, es a dir el TCP.

En el robot d'estudi hi ha sis juntes, per tant existiran com a mínim 6 Matrius Homogènies. I la cadena cinemàtica ha de ser una combinació d'aquestes. Cal comentar que els paràmetres H-D són referits a la base anterior.

Ara, a partir de les dades geomètriques del Robot (Figura 38) s'obté la Taula 9

DH	d	θ	a	α
1	?	Alpha1	0	0
2	?	0	320	Alpha2
1 i 2	780	Alpha1	320	Alpha2
3	1075	90° + Alpha2	0	90°
4	0	Alpha4	200	90°
5	1392	Alpha5	0	-90°
TCP	200	Alpha6	0	0

Taula 9: Paràmetres Danavit- Hartenberg

$i \rightarrow$ braç que s'analitza. La base R_i és la final del braç i , i la junta i és a l'inici del braç i (R_i no està on és la junta i !)

$d \rightarrow$ distància (en l'eix z) des de la base R_{i-1} fins la R_i (longitud z del braç) (si es lineal només canvia aquest paràmetre, que dependrà del temps)

$\theta \rightarrow$ angle de rotació de la base R_i respecte R_{i-1} sobre el pla xy , eix z . (si es rotacional només canvia aquest paràmetre, que dependrà del temps, de fet tots els casos d'estudi són d'aquest tipus)

$a \rightarrow$ distància en el pla xy des de la base R_{i-1} fins la R_i (longitud $|x_{y}|$ del braç)

$\alpha \rightarrow$ angle de rotació de la base R_i respecte R_{i-1} (o braç) sobre el pla zy , eix x .

5. Calcular la transformació homogènia base-punta

Aplicuem la Matriu homogènia de Roto-translació de tota la cadena cinemàtica des de la base fins l'extrem del robot.

La **Matriu Homogènia** és una matriu que inclou els termes necessaris per tal de passar d'una base matemàtica a una altra. Per tant té un termes referits a la translació i uns altres a rotació, ja que ha de definir els 6 graus de llibertat (robot antropomòrfics).

Un **Canvi de base** pot ser per Rotació i/o Translació. Per canviar un vector d'una base a una altre, es farà de la següent manera: multiplicant-lo per la matriu de Rotació i sumant el vector Translació

Repetir tants cops com canvis de base tinguem (articulacions, joints)

$$v_{B(t)} = R_{B(t)}^A \cdot v_{A(t)} + t_{B(t)}^A \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$\vec{v}_{B(t)} = \left[R_{B(t)}^A \right] \cdot \vec{v}_{A(t)} + \vec{t}_{B(t)}^A \quad [\text{Eq. 2}]$$

On R són els eixos finals B representats (ficats) en una matriu dels eixos originals A (en vertical). Eixos B en A

On T és el vector del desplaçament del canvi de base (sol ser el braç per gir realitzat segons cada eix)

En la **Representació Homogènia** s'uneixen la matriu de Rotació i Translació en una de sola, que és la Matriu de Roto-translació.

$$\tilde{v}_B = T_B^A \cdot \tilde{v}_A \quad [\text{Eq. 3}]$$

$$\text{On } T_B^A = \begin{bmatrix} R_B^A & t_B^A \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & t_B^A \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_B^A & 0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{v}_A = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Tot hi que sembla la matriu de roto-translació és 2x2, realment és una 4x4, tal com és mostra en el cas d'estudi:

$$T_{i-1}^i = \begin{pmatrix} \begin{matrix} R_{11} & R_{21} & R_{31} \\ R_{12} & R_{22} & R_{32} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} \end{matrix} & \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \end{matrix} & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 40: Matriu de Roto-Translació Base_Punta

$$\begin{aligned}
R11 &= ((-ca1 * a2 * ca3 - ca1 * ca2 * sa3) * ca5 + (-ca1 * sa2 * sa3 - ca1 * ca2 * ca3) * sa5) * sa6 - ((- \\
&\quad ca1 * sa2 * ca3 - ca1 * ca2 * sa3) * sa4 + sa1 * ca4) * ca6 \\
R21 &= ((-ca1 * sa2 * ca3 - ca1 * ca2 * sa3) * sa5 - (-ca1 * sa2 * sa3 - ca1 * ca2 * ca3) * sa5) * ca6 + ((- \\
&\quad ca1 * sa2 * ca3 - ca1 * ca2 * sa3) * sa4 + sa1 * ca4) * sa6 \\
R31 &= (-ca1 * sa2 * ca3 - ca1 * ca2 * sa3) * sa5 - (-ca1 * sa2 * sa3 - ca1 * ca2 * ca3) * ca5 \\
R12 &= ((-sa1 * sa2 * ca3 - sa1 * ca2 * sa3) * ca5 + (-sa1 * sa2 * sa3 - sa1 * ca2 * ca3) * sa5) * sa6 - ((- \\
&\quad sa1 * sa2 * ca3 - sa1 * ca2 * sa3) * sa4 - ca1 * ca4) * ca6 \\
R22 &= ((-sa1 * sa2 * ca3 - sa1 * ca2 * sa3) * sa5 - (-sa1 * sa2 * sa3 - sa1 * ca2 * ca3) * ca5) * ca6 + ((- \\
&\quad sa1 * sa2 * ca3 - sa1 * ca2 * sa3) * sa4 - ca1 * ca4) * sa6 \\
R32 &= (-sa1 * sa2 * ca3 - sa1 * ca2 * sa3) * sa5 - (-sa1 * sa2 * sa3 - sa1 * ca2 * ca3) * ca5 \\
R13 &= ((ca2 * ca3 + sa2 * sa3) * ca5 + (ca2 * sa3 + sa2 * ca3) * sa5) * sa6 - \\
&\quad (ca2 * ca3 + sa2 * sa3) * sa4 * ca6 \\
R23 &= ((ca2 * ca3 + sa2 * sa3) * sa5 - (ca2 * sa3 + sa2 * ca3) * ca5) * ca6 + \\
&\quad (ca2 * ca3 + sa2 * sa3) * sa4 * sa6 \\
R33 &= (ca2 * ca3 + sa2 * sa3) * sa5 - (ca2 * sa3 + sa2 * ca3) * ca5 \\
T1 &= 200 * (-ca1 * sa2 * ca3 - ca1 * ca2 * sa3) * sa5 - 200 * (-ca1 * sa2 * sa3 - ca1 * ca2 * ca3) * \\
&\quad * ca5 + 1392 * ca1 * sa2 * sa3 + 1392 * ca1 * ca2 * ca3 - 200 * ca1 * sa2 * ca3 - \\
&\quad 200 * ca1 * ca2 * sa3 - 1075 * ca1 * sa2 + 320 * ca1 \\
T2 &= 200 * (-sa1 * sa2 * ca3 - sa1 * ca2 * sa3) * sa5 - 200 * (-sa1 * sa2 * sa3 - sa1 * ca2 * ca3) * sa5 \\
&\quad + 1392 * sa1 * sa2 * sa3 + 1392 * sa1 * ca2 * ca3 - 200 * sa1 * sa2 * ca3 - 200 * sa1 * ca2 * sa3 - \\
&\quad 1075 * sa1 * sa2 + 320 * sa1 \\
T3 &= 200 * (ca2 * ca3 + sa2 * sa3) * sa5 - 200 * (ca2 * sa3 + sa2 * ca3) * ca5 + 780 - 1392 * ca2 * sa3 - \\
&\quad 1392 * sa2 * ca3 + 200 * ca2 * ca3 + 200 * sa2 * sa3 + 1075 * ca2
\end{aligned}$$

A partir d'aquest punt, tots càlculs s'han realitzat amb el suport informàtic de *MatLab*®. Els arxius es poden consultar en un document adjunt, executable des del *MatLab7.1*®.

En la singularitat cinemàtica, és quan es pot definir una posició de l'extrem del robot, amb diverses alternatives en quan a les configuracions dels angles de les juntes. Aquest fet és important ja que en canells eulerians, això succeirà segur. Per tant com que existiran diverses alternatives en quan a la configuració d'angles (arribant fins algun cas a l'infinit), el protocol a seguir és el de mínima rotació respecte la posició anterior.

3.3.2. MasterCam®

[MasterCam](#)® és un software d'assistència al mecanitzat. Aquest tipus de programes es coneixen com a CAM, de les sigles en anglès de *Computer Assisted Machining*. És un software ideat per a treballar amb màquines de Control Numèric i Centres de Mecanitzar de 3 fins a 5 eixos.

Aquests sistemes, no solament disposen d'utilitats gràfiques i geomètriques molt potents, que permeten modelar i representar les figures i trajectòries a recórrer per la màquina, sinó que, al mateix temps, són capaços de generar els programes-peça que haurà d'executar el CNC mitjançant el que s'anomena **mòduls de post-processat**. [W.19] En l'aplicació específica de l'estació de treball analitzada, el mòdul de processat el realitza el mòdul RobotMaster®.

El **post-processat** és un procés que s'ha de realitzar sempre que es vulgui enviar un programa, que s'hagi fet amb un software CAM, a una màquina eina de Control Numèric. Aquest fet es degut a que cada software CAM utilitza un codi o llenguatge intern propi, i d'igual manera cada màquina de mecanitzar només reconeix un sol tipus de llenguatge, i aquests no és el mateix del software, per tant cal realitzar la "traducció". Aquesta traducció és precisament el post-processat.

El **llenguatge-màquina** sol ser propi per cada fabricant de màquines eina de Control Numèric. Existeixen diversos codis de llenguatge-màquina, els més comuns són:

- [HEIDENHAIN](#)
- [FAGOR](#)
- [RAPID](#), llenguatge propi dels Robots ABB

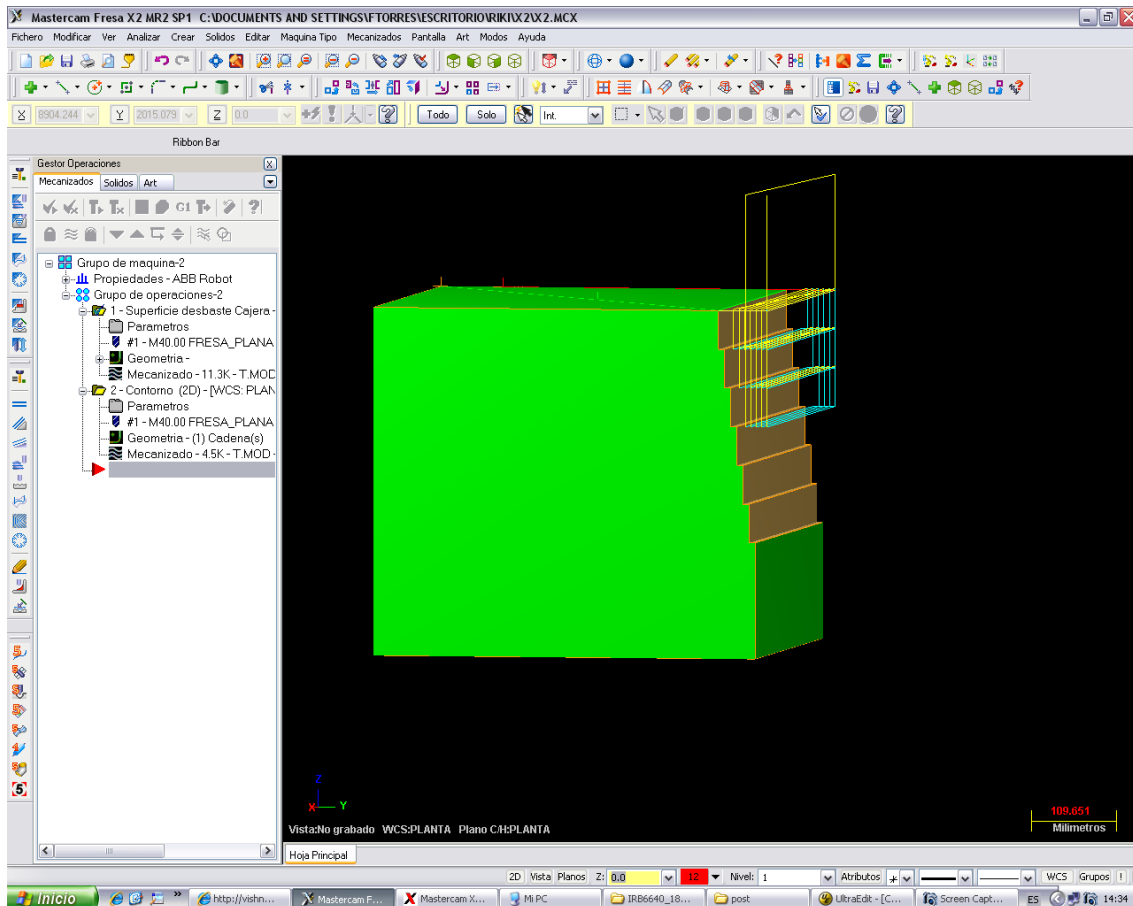


Figura 41: MasterCam

La elecció del programa MasterCam® ha estat especificada pel *Centre Tecnològic Ascamm*. Això es degut a que existeix un conveni de cooperació entre el fabricant del software i el Centre Tecnològic. Aquesta col·laboració és molt positiva ja que ens ha permès d'utilitzar el mòdul de software de RobotMaster® en primícia.

A més a més, MasterCam és el software d'assistència al mecanitzat més comú en l'industria [W.9]

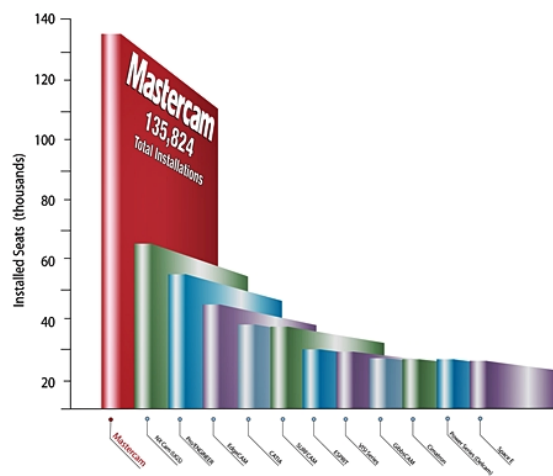


Figura 42: Utilització de Software CAM [W.9]

3.3.3. RobotMaster®

El [RobotMaster®](#) és una aplicació dissenyada per al software de MasterCam®. És un mòdul que amplia les possibilitat del mecanitzat, apart de les màquines tradicionals de 3 i 5 eixos, fins a l'ús dels robots antropomòrfics de 6 eixos.

Aquest mòdul té dues aplicacions especialment destacables:

1. Permet simular i veure com mecanitza el Robot durant tot el programa dissenyat
2. Permet traduir les trajectòries i programes de mecanitzat al llenguatge RAPID (post-processat)

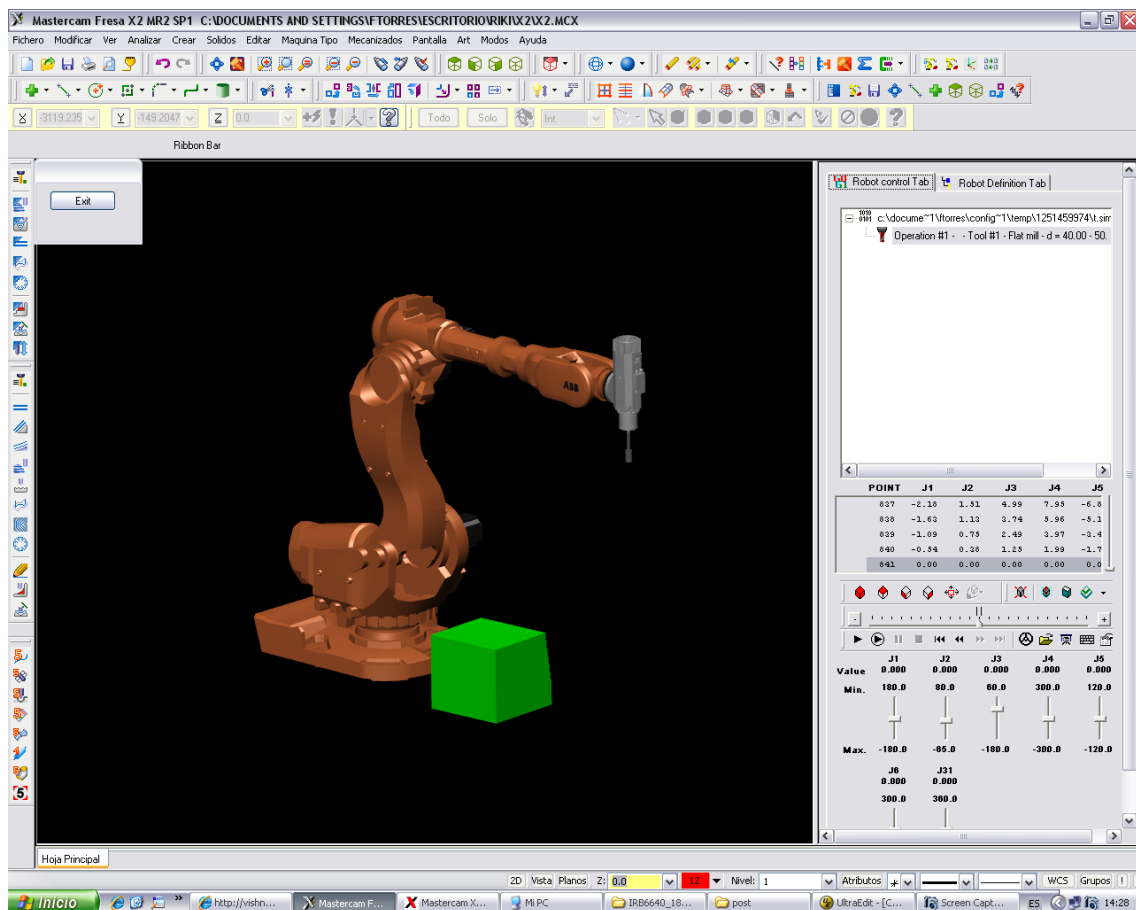


Figura 43: RobotMaster

3.3.4. RobotStudio®

El [RobotStudio®](#) és un software especialment dissenyat per utilitzar aquest tipus de robot. Aquest software ha estat desenvolupat per el propi fabricant de Robot, és dir *ABB*.

El RobotStudio® és una eina molt potent per a treballar amb estacions i sistemes que integrin:

- l'armari de control IRC amb FlexPendant
- Robots, especialment els ABB
- Altres màquines
- Qualsevol element de l'entorn

Ja que permet:

- simular tot l'entorn on treballa el robot
- crear els programes que es volen executar al robot i qualsevol altre màquina (**programació off-line**)
- de fet permet crear entorns on treballin fins a 4 Robots (**MultiMove**)
- alhora el programes creats és escriu en llenguatge-màquina RAPID, de forma que no requereix post-processat
- programar les entrades i sortides del Controlador
- simular els programes, inclús els que no s'han creat amb aquest software. Aquest fet és importants per nosaltres creen els programes de mecanitzat en MasterCam®.
- enregistrar les simulacions
- detectar col·lisions i aproximacions perilloses

La utilització en programació off-line, permeten crear una copia digital perfecte del sistema del robot, on juntament amb les potents capacitats de programació i aplicacions de simulació, el software permet que l'operari treballi en nous programes mentrestant el robot segueix treballant, i evitar problemes abans que aquest comenci a treballà. Augmentant així l'eficiència i productivitat, alhora que minimitza costos i averies.

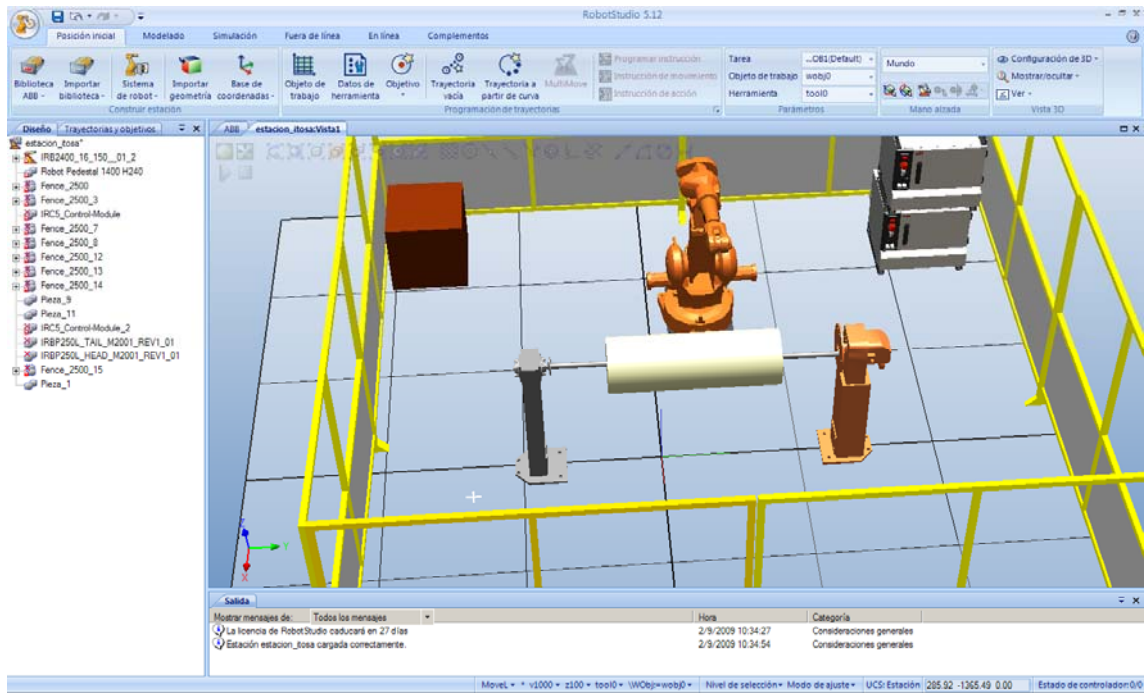


Figura 44: RobotStudio

3.4. Integració de sistemes

La integració de tots els sistemes és imprescindible per tal de sincronitzar els elements. Això és degut a que la tasca que es vol realitzar, el fresat, es realitzarà amb diversos productes industrials que es subministren per separat.

Com que els elements que integren l'estació ja han estat analitzats en detall, per tant, aquí només s'exposaran les interaccions entre ells.

El recorregut de l'informació està exposat a la Figura 46.

S'ha distingit els següents tipus de relacions:

- Control operari
- Senyals elèctrics
- Potència elèctrica
- Potència pneumàtica, aportada per un sistema extern a l'estació
- Mecànica, entre el posicionament del extrem del robot i el mandrí, en els 6 graus de llibertat

La descripció de les connexions és la de la següent taula:

Element Emissor	Element Receptor	Tipus Connexió
Computadora	Control. Robot	Cable Ethernet (8pins)
Computadora	Control. Mandrí	Cable Ethernet (8pins)
Control. Robot	Robot	Propi ABB
Control. Robot	Plat divisor	Standard
Control. Robot	Control. Mandrí	Standard
Control. Mandrí	Mandrí	propi
Instal·lació Pneumàtica	Plat Divisor	Conducte Pneumàtic (5mm)
Instal·lació Pneumàtica	Mandrí	Conducte Pneumàtic (5mm)

Taula 10: Tipus Connexions

Les connexions que arriben al mandrí s'han d'instal·lar amb molta cura, ja que el mandrí està situat al TCP, és a dir a l'extrem de Robot, i el Robot és un element mòbil. Aquesta instal·lació ha requerit un projecte intern.

El FlexPendant està connectat al Controlador per un cable que està integrat al propi FlexPendant, i té una longitud de 10 metres

Les entrades i sortides del armari controlador del Robot (I/O) estan exposades en el capítol del [Controlador del Robot](#).

S'han dut a terme totes les condicions de [posta a punt](#), per tal de garantir un bon funcionament.

El Lay-out de l'estació experimental es pot apreciar en la Figura 45. Aquesta distribució en planta no és rellevant, ja que al ser l'Ascamm un centre tant dinàmic la distribució no és fixa, i per conseqüent no s'han creat plànols

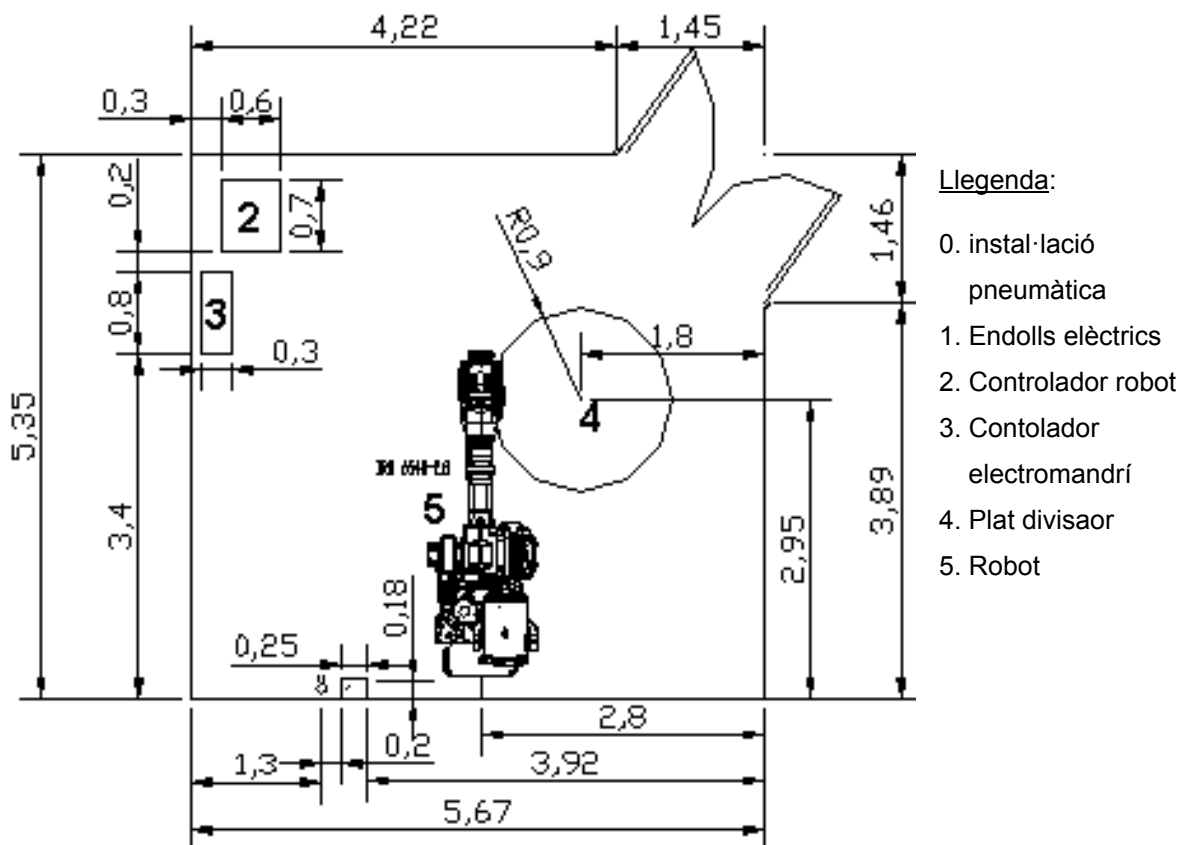


Figura 45: Lay-out Estació Experimental

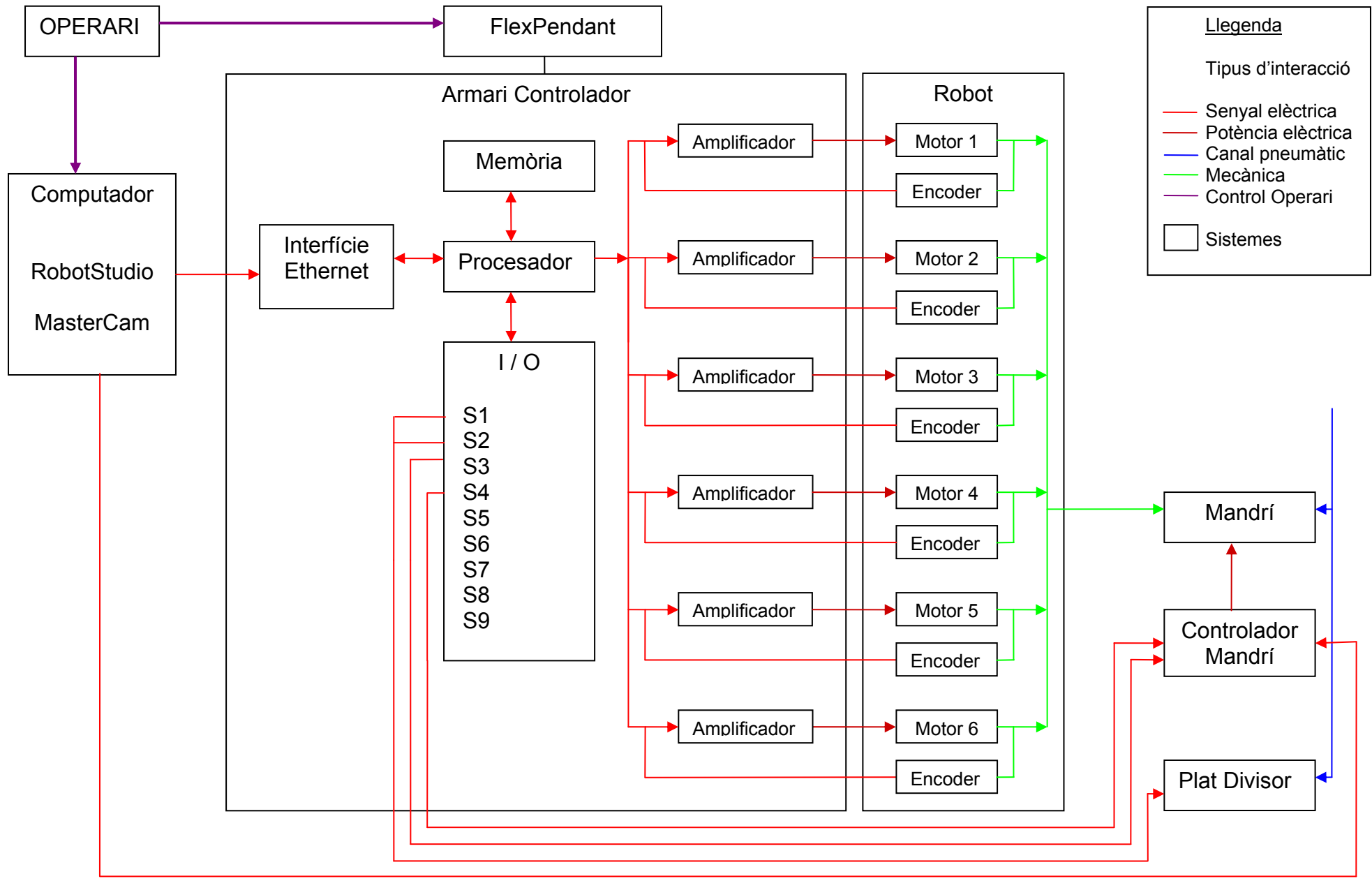


Figura 46: Integració dels Sistemes

4. PROBLEMÀTICA DE L'ÚS DE ROBOTS ANTROPOMÒRFICS PER A MECANITZAR

Pel fet d'utilitzar diverses tecnologies per a dur a terme una sola acció, s'han de contemplar les limitacions de cadascuna.

Per tal d'analitzar les diverses problemàtiques s'ha distingit entre la problemàtica del Robot (i tot el conjunt mecànic fins el TCP) i l'ús de les eines.

4.1. *Robot*

La precisió d'un robot ve definida per diversos aspectes, aquests aspectes són:

- La transferència de les dades de l'objectiu teòric del ordinador fins al controlador
- La resolució dels elements de control
- La precisió dels elements mecànics (motors, engranatges, braços, etc)

Aquests conceptes defineixen el terme repetibilitat, que vol dir la precisió que tindrà el robots quan repeteixi la mateixa acció.

En el cas de l'estació d'estudi els valors són [W.20]:

Repetibilitat de posició = 0,07mm

Repetibilitat de trajectòria = 0,7mm

El valor de posició és inferior ja que el robot es para al assolir l'objectiu, i el de trajectòria el robot passa per l'objectiu a màxima velocitat [L.3].

La precisió de la transferència del objectiu teòric s'ha minimitzat utilitzant dades i paràmetres rodons en el sistema de referència del control del robot.

La resolució dels elements de control és intrínseca al robot, i per tant ni s'hi pot actuar. A la precisió dels elements mecànics és la principal que actua a l'hora de realitzar el present estudi.

Existeixen dos propietats físiques que afecten als components mecànics, aquestes són:

- Joc, en els motors, engranatges, i elements mòbils
- Rigidesa, especialment dels braços i barres
- Resolució dels motors pas a pas

Actualment existeixen tecnologies que són capaces de millorar aquest comportament. Aquestes tecnologies de seguiment de l'eina (traking), que verifiquen, des de posicions alienes al robot, la posició real, i llavors comparant-les als objectius teòrics, es pot conèixer la desviació, i corregir-la en temps real. Aquestes tècniques no han estat aplicades en l'estació d'estudi.

4.2. Maquinabilitat

En les tasques de mecanitzat no només s'ha de tenir en compte l'eina sinó també el material, és a dir l'interacció eina-material.

Les interaccions entre l'eina i el material s'ha de tenir present al dissenyar el procés de mecanitzat i l'eina pròpiament dita, de forma que els fabricants dissenyen les eines i els protocols d'ús, depenent dels materials amb que es vagi a treballar. Com que en el present estudi es treballa Porexpan®, aquest és un material molt tou i fàcil de treballar.

Cal mencionar que en aquests treball no s'analitzarà el desgast de l'eina, tot hi que per l'indústria és un problema de costos molt important. Tanmateix, existeixen molts estudis referits al desgast de l'eina.

De forma general, es pot definir la **maquinabilitat** d'un material com la facilitat relativa amb que es pot mecanitzar un material utilitzant eines i condicions de tall adients. De totes maneres, no s'ha trobat cap criteri universalment acceptat per definir la maquinabilitat. Donat que es tracta d'un concepte un xic difús, existeixen diferents punts de vista en els criteris d'avaluació d'aquest paràmetre.

De forma qualitativa, la maquinabilitat es pot valorar analitzant diferents aspectes. A continuació es recullen alguns exemples de criteris de valoració segons els autors de la literatura consultada.

Segons Serope Kalpakjian i Steven R. Schmid [T.4], la maquinabilitat es defineix segons quatre factors: acabat i integritat superficial, duració de l'eina, forces, potència necessària i tipus de ferritja generada. Per tant, una bona maquinabilitat es tradueix en un bon acabat i integritat de la superfície, una llarga vida de l'eina, i baixos requeriments de potència i forces durant el tall. Pel que fa al control de la ferritja, el fet que aquesta sigui estreta i llarga pot interferir en l'eina, disminuint així la maquinabilitat.

D'altra banda J.Temple Black, E. Paul DeGarmo i Ronald A. Kohser [T.4] exposen que la maquinabilitat es pot definir des de tres punts de vista:

1. Tenint en compte la facilitat o dificultat amb la que un material pot mecanitzar-se. Sota aquest punt de vista, s'empren mesures com ara la potència específica o la força de tall, de manera que com més grans siguin aquests paràmetres, més difícil serà mecanitzar el material.
2. Considerant la velocitat de tall relativa per a una durada de l'eina donada al mecanitzar un cert material, en comparació amb el material patró que ha estat mecanitzat amb una eina del mateix material.
3. En darrer lloc, es pot valorar la facilitat d'extracció de la ferritja, la qualitat de l'acabat superficial, l'estabilitat dimensional del procés o el cost d'eliminar un volum de material donat.

Segons Edward M. Trent [T.4], la maquinabilitat és un terme complex a l'hora de definir-lo donat que existeixen diferents aspectes que permeten avaluar-la, com ara els citats a continuació:

- Vida de l'eina: quantitat de material arrencat per l'eina fins al seu desgast.
- Forces que actuen sobre l'eina: forces a les que està sotmesa l'eina durant el mecanitzat i que poden ser mesurades mitjançant galgues extensiomètriques.
- Acabat superficial: rugositat i qualitat dimensional obtinguda en una determinada operació de mecanitzat.
- Forma i tamany de la ferritja: es valora l'entorpiment que causa l'evacuació de la ferritja en el procés de mecanitzat.

A grans trets, es pot dir que Trent considera la maquinabilitat dels materials, no com una propietat del material en qüestió, sinó com una manera de valorar el comportament dels materials durant el tall. Per tant, la valoració de la maquinabilitat d'un material hauria d'especificar les condicions de tall per a les que té validesa.

Altres autors, com ara Giam Federico Micheletti i Mikell P. Groover [T.4], coincideixen en que la forma més habitual de comparar la maquinabilitat relativa és el quocient de velocitats índex (Eq. 4). Aquest quocient permet contrastar el comportament del mecanitzat de dos materials en idèntiques condicions (màquina, eina, refrigerant, operació de mecanitzat, etc.)

$$I = \frac{V_{60 \text{ material assajat}}}{V_{60 \text{ material referència}}} \quad [\text{Eq. 4}]$$

on: $V_{60 \text{ material assajat}}$ és la velocitat de tall que provocaria una vida d'eina de 60 minuts mecanitzant el material de l'assaig.

$V_{60 \text{ material referència}}$ és la velocitat de tall provocaria una vida d'eina de 60 minuts mecanitzant el material de referència.

Per tal que l'índex obtingut pugui ser indicatiu de la maquinabilitat del material objecte d'assaig, Micheletti estableix que cal tenir en compte els següents punts:

- La màquina utilitzada ha de disposar de suficient potència per tal d'assegurar que manté la velocitat de tall constant durant tot el procés.
- Si l'assaig realitzat, com passa habitual, és un cilindrada en el torn, es recomana que la relació entre longitud i diàmetre de la peça assajada no excedeixi de 10:1.
- Cal assegurar les característiques, tant geomètriques com de composició de l'eina, per tal que els assaigs siguin comparables.
- Les mesures de les franges de desgast que defineixen la vida de l'eina s'han de poder mesurar de forma precisa.

José María Lasheras defineix la maquinabilitat com l'aptitud que tenen els materials per a ser conformats mitjançant mecanitzat en màquines eina. Aquest autor proposa mesurar-la per mitjà d'assaigs en els que es valora algun dels paràmetres següents:

- Durada de l'eina entre esmolats.

- Velocitat de tall necessària per tal d'obtenir una determinada vida de l'eina.
- Força de tall en l'eina.
- Temperatura de tall.
- Treball de tall.
- Producció i forma de la ferritja.

El mateix autor posa de manifest que, segons s'ha comprovat experimentalment, la maquinabilitat depèn principalment de la composició química del material, la seva composició (microestructura), el seu contingut en inclusions, la seva duresa, l'acritud i el tamany del gra.

Finalment, Joan Vivancos i Cayetano Sierra, per tal de comparar la maquinabilitat de dos materials, proposen un assaig de cilindrada amb les mateixes condicions d'assaig (màquina, refrigerant, etc.), la mateixa eina i idèntiques condicions de tall, en el que es mesura el desgast patit per l'eina cada cert interval de temps.

Ahora podem augmentar la velocitat de desbast, podem aplicar tecnologies de **ràpid mecanitzat**. Fins ara això es fa amb màquines molt sofisticades i costoses, però els Robots antropomòrfics obren un món de possibilitats, ja que permeten realitzar tasques de mecanitzat ràpid, amb màquines més econòmiques i flexibles. Cal dir que la precisió del mecanitzat amb Robots mai es podrà comparar amb els Centres de Mecanitzat, ja que aquests estan dissenyats específicament per a tasques de mecanitzat ràpid.

4.3. Conclusions

Per concloure, les limitacions que aporta el Robot i el seu conjunt mecànic, són la falta de rigidesa, fet que comporta vibracions i per tant rugositat i falta de precisió. **Aquesta màquina s'ha de compara amb una màquina eina de baixa rigidesa.**

Si en una màquina de baixa rigidesa se li aplica una força excessiva, cedirà. Per tant s'hauran d'**evitar** accions que actuïn en aquest sentit, **accions com velocitat d'avanços grans i una relació $a_1 \cdot a_p$ també gran** (per tant com més petits millors).

Cal comentar que ens les màquines-eine tradicionals compten amb una limitació que el Robot antropomòrfic no compta, ja que el volum de treball d'un robot estàndard és molt més gran que una màquina eina estàndard.

En quan a les **eines**, han de permetre una ràpida evacuació del material. Ja que es realitzaran tasques de **mecanitzat d'alta velocitat** en materials tous.

Tots els factors que limiten el bon funcionament estaran analitzats en els experiments.

5. EXPERIMENTS

L'objectiu del present estudi és la definició de la possibilitat per a mecanitzar d'un robot antropomòrfic, específicament la precisió del conjunt d'elements necessaris per a dur a terme aquesta acció.

Com a objectiu resultant d'aquesta sèrie d'experiments, és el de determinar els comportaments d'aquests tipus de mecanitzats. De forma i manera que es conegui el comportament del mecanitzat abans de realitzar-lo, ja que d'aquesta manera es dissenyaran els protocols d'actuació.

5.1. Programació

Els recursos disponibles són els exposats en la Taula 11.

Recurs	Quantitat
Personal	1
Estació Experimental	
Robot	1
Mandrí	1
Controlador	1
Plat Divisor	1
Eines	
Portaeines	5
Software	
RobotStdudio	1
MasterCam i RobotMaster	1
Instrumentació Mesura	
Peu de Rei	1
Palmer mesura forats	1

Taula 11: Recursos Disponibles

I les tasques a realitzar en el transcurs de l'experiment són:

- Disseny experiments
- Realització experiments
- Anàlisi de resultats

Les interaccions entre recursos i funcions està exposada a la Taula 1.

	Personal	Est. Experm.	Software	Ins.Mesura
Disseny experiments	X		X	
Realització experiments		X		
Anàlisi de resultats	X			X

Taula 1: Interacció Funcions-Recursos

Funcions	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6	Set 7	Set 8	Set 9	Set 10	
Disseny experiments											
Realització experiments											
Anàlisi de resultats											

Gràfica 10: Gantt Funcions

Recursos	Set1	Set2	Set3	Set4	Set5	Set6	Set7	Set8	Set9	Set10
Personal										
Est. Exper.										



Gràfica 11: Gantt Recursos

5.2. Metodologia

La realització d'aquests experiments estan basats en protocols estàndaritzats. Aquestes normes són la *UNE – ISO*. Aquí es presenten les condicions principals extretes de la norma. *9283:1998 Robots manipuladors industrials. Criteris d'optimització i mètodes d'anàlisi relacionats*.

L'actual experiment està definit en la norma, com assaig de **precisió i repetibilitat de trajectòria**.

5.3. Disseny d'Experiments

5.3.1. Objectiu de l'Experiment

Analitzar el comportament del sistema Robot-Mandrí en quan a la **precisió** a l'hora de mecanitzar un model de Porexpan®.

5.3.2. Plantejament del Problema

Els experiments aquí descrits es realitzaran seguin un Disseny factorial 2². Es considera un disseny factorial de 2 factors i 2 nivells.

Els factors que s'han considerat que afecten al mecanitzar i podem aplicar a les màquines són:

- Velocitat d'avanç
- Velocitat de rotació de l'eina (a partir d'ara velocitat de rotació)

Per tal d'establir un mètode adimensional, en que el procés sigui independent del diàmetre de l'eina, s'estableixen els següents factors d'experimentació:

- Velocitat de tall, V_c , derivat de l'interacció entre eina i material
- Avanç lineal per dent, f_z

Tanmateix es podrien considerar molts altres factors, ja que el robot compta amb 6 graus de llibertat i 6 graus de moviment, es a dir que hi ha 6 motors que controlen el seu moviment, alhora hi ha 6 braços de dimensions diferents i de rigideses diferents. L'influència de cada un d'aquest elements actuen segons la força i velocitat que sofreixen, de forma que els factor que s'han determinat són els que actuen sobre la força i la velocitat que adquireix el robot.

Alhora, es considera la precisió en direcció a l'eix, i en radi, de la fresa. Ja que encara que es mecanitzi amb 6 eixos, el treball que realitza l'erosió del material ho realitza una fresa.

NOTA: Els experiments no s'han de realitzar en l'ordre indicat en la matriu d'experiments. El motiu és evitar que l'efecte d'un factor es confongui amb el d'un altre factor i s'introdueixi biaix als valors dels efectes.

5.3.3. Factors i Domini Experimental

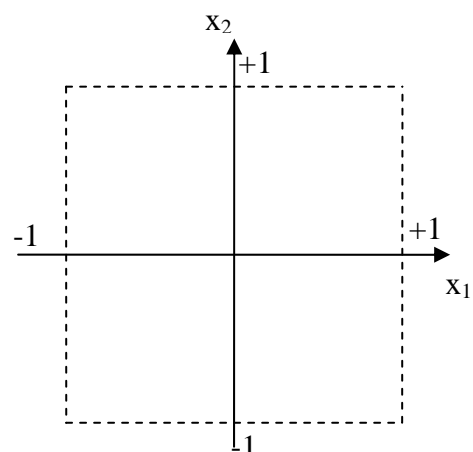
Els valors mínims i màxims dels factors a analitzar són els establerts a la Taula 12. El valor mínim descriu el nivell inferior, i el valor màxim descriu el nivell superior d'aquell factor.

Factors	Domini experimental	
	Nivell (-)	Nivell (+)
x1: Velocitat de tall	190 m/min	750 m/min
x2: Avanç per dent	0,0005 mm	0,07 mm

Taula 12: Factors i Domini Experimental

5.3.4. Matriu d'Experiments

La Figura 47 representa el domini experimental combinat pels tres factors. Cada cercle indica un



possible experiment amb uns valors concrets de cada factor. Quins experiments són els més adients per conèixer com afecta cada factor al rendiment de l'operació.

	Matriu Experiments		Pla d'Experimentació	
	x1	x2	Vc	fz
1	-	-	190	0,00055
2	+	-	750	0,00055
3	-	+	190	0,07
4	+	+	750	0,07

Taula 13: Matriu d'Experiments d'un Disseny Factorial 2^2 i Pla d'Experimentació

Per a conèixer l'efecte d'un factor és suficient amb fer-lo variar entre dos valors. Els més adequats són els extrems del seu domini experimental: entre el nivell -1 i el $+1$. I, a més, aquesta variació s'ha de realitzar per a cada possible combinació dels valors de la resta de factors. Això ens permetrà descobrir si l'efecte depèn de quin valor prenguin els altres factors. Totes aquestes combinacions estan contemplades al disseny factorial complet 2^3 de la Taula 13. En total vuit experiments corresponents a 2 nivells de la velocitat de tall, x 2 nivells de passada en profunditat i x 2 nivells d'avanç per dent. En la Figura 56, es mostren que aquests experiments es realitzen en els extrems del domini experimental. Ressaltar que cap parella de factors varia sempre en la mateixa direcció. Les columnes no estan correlacionades sinó que són ortogonals, amb tants signes $+$ com signes $-$. Això ens permetrà estimar un efecte independentment dels altres.

5.3.5. Proveta i execució de l'experiment

Es mecanitza segons normativa d'assajos UNE-ISO 9283.

La temperatura ambiental és de 25°C . El Robot té una càrrega en l'extrem de $59,7\text{kg}$, corresponent a la massa de l'electromandrí.

Es realitzaran passades laterals d'escairat ($a_p=50\text{mm}$ i $a_L=8\text{mm}$) amb trajectòries i velocitats definides pels factors. La imatge del procés és tal com la Figura 50. L'entrada i

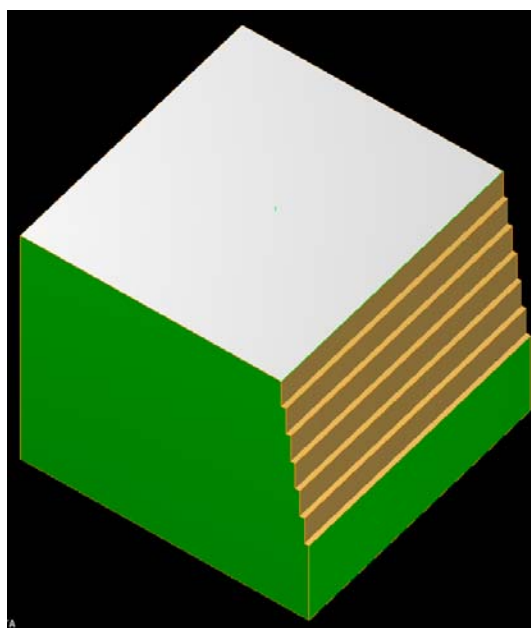


Figura 48: Proveta d'Assajos

sortida es realitza a velocitat de treball, sense pendents d'acceleració. Fresat en oposició.

La forma del model de la proveta és un cub de 50x50x50 cm de poliestirè expandit (de la marca comercial Porexpan®) amb una densitat de 20kg/m³.

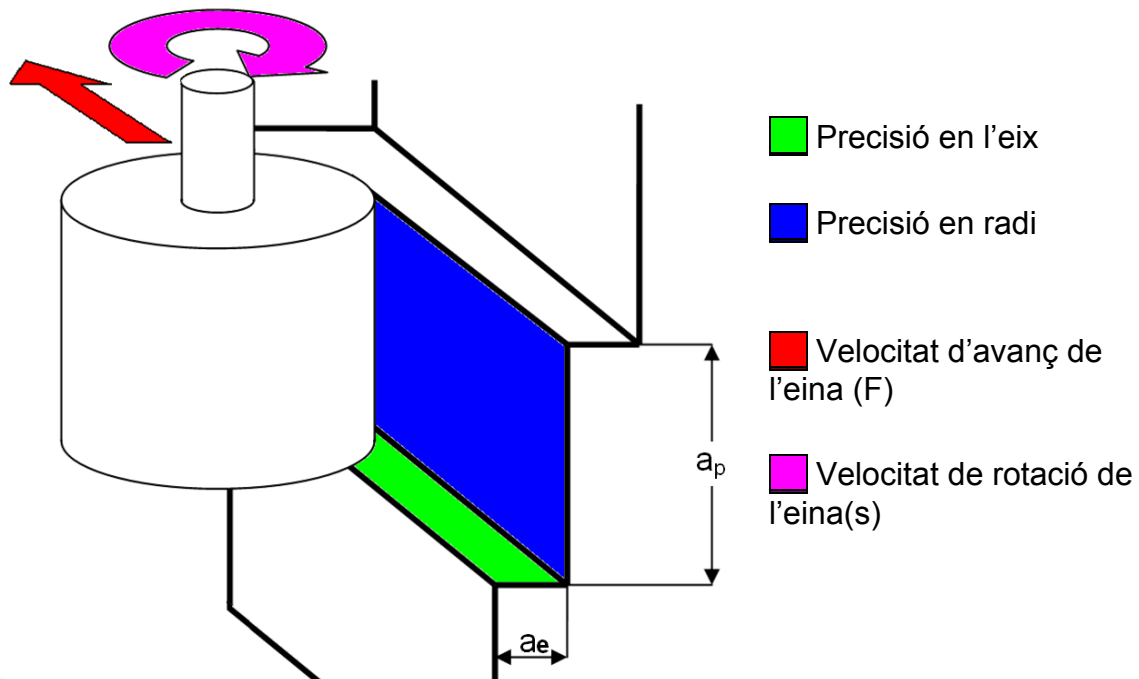


Figura 49: Procés de Mecanitzat de la Proveta

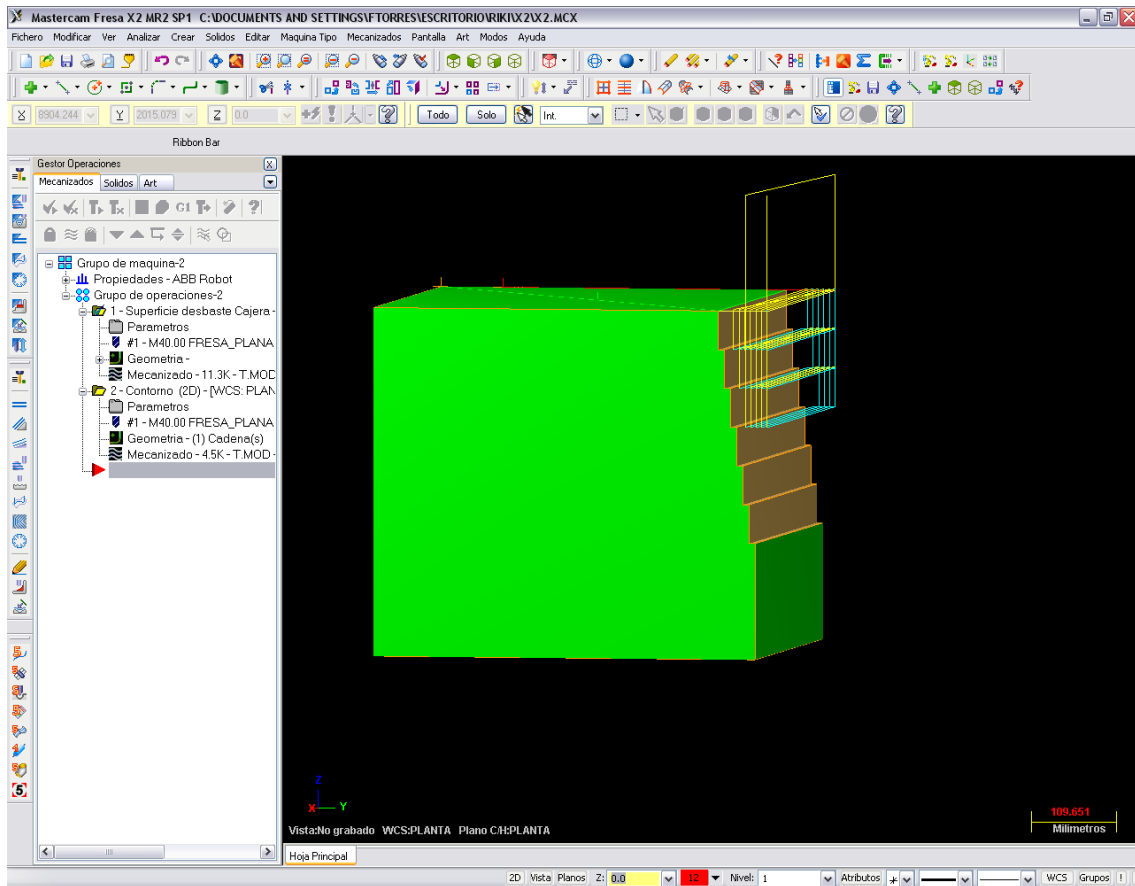


Figura 50: Procés de Mecanitzat de la Proveta en MasterCam
L'eina de treball serà de les següents característiques:

Marca	GUHRING
Model	A9 9180 Fire HSS-CO8
Tipus	Fresa d'acabat, no equilibrada
Fils de tall	6
Diàmetre	40mm
Longitud de tall	55mm
Longitud total	63mm

Taula 14: Característiques Tècniques de l'Eina Utilitzada en l'Experiment



Figura 51: Eina de Tall emprada en l'Experiment

Els aparells de mesura són micròmetres amb les següents característiques:

Marca	Mitutoyo
Model	128 Single Rod
Tipus	Palmer mira forats (depth micrometer)
Norma	DIN 862
Precisió	0,01 mm
Longitud màxima	25 mm
Base	101,6x16 mm ²

Taula 15: Característiques Tècniques del Palmer

Marca	TESA
Model	Shop Cal
Tipus	Peu de rei digital
Norma	DIN 862
Precisió	0,01 mm
Longitud màxima	150mm

Taula 16: Característiques Tècniques del Peu de Rei



Figura 52: Palmer Mesura forats

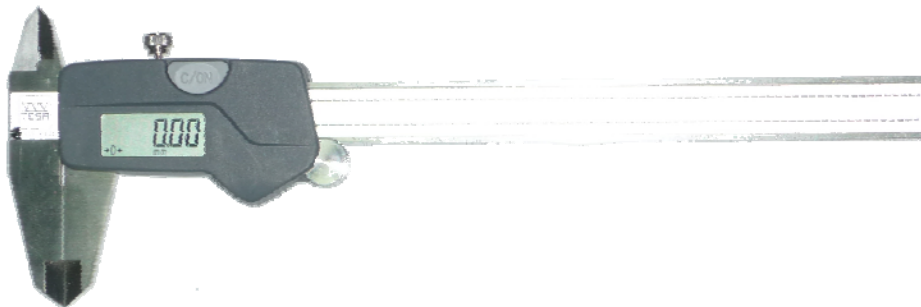


Figura 53: Peu de Rei Digital

La mesura de la precisió s'ha realitzat amb molta diligència. Existeix una dificultat en la mesura de la precisió, ja que com s'ha comentat el Porexpan® és un material tou, i quan se li aplica una càrrega, per petita que sigui, el material cedeix.

Les mesures s'han realitzat en diversos punt de manera aleatòria, sense exercir càrrega als micròmetres.



Figura 54: Execució de les Mesures

5.3.6. Resultats mesurats

S'han obtingut els següents valors com a resultats dels assajos:

	Matriu Experiments		Pla d'Experimentació		Respostes	
	x1	x2	Vc	fz	Precisió en Z	Precisió en R
1	-	-	190	0,00055	0,406	0,132
2	+	-	750	0,00055	0,222	0,148
3	-	+	190	0,07	1,812	10,822
4	+	+	750	0,07	0,71	0,752

Taula 17: Matriu d'Experiments del Disseny Factorial 2^2 , Pla d'Experimentació i respostes mesurades

Direcció Axial

Valor Teòric 50,00 mm

Experiment nº	Promig	Desviació Típica	Valors Experimentals				
1	50,406	0,08	50,37	50,38	50,52	50,47	50,29
2	50,122	0,22	49,84	50,16	49,91	50,25	50,45
3	53,02	2,98	52,98	53,31	52,77	53,11	52,57
4	50,71	0,32	50,63	50,71	50,94	51,11	50,16

Taula 18: Resultats Obtinguts en Precisió en l'Eix, i el seu Promig i la Desviació Típica

Direcció Radial

Valor Teòric 8,00 mm

Experiment nº	Promig	Desviació Típica	Valors Experimentals				
1	8,132	0,08	8,21	8,14	8,21	8	8,1
2	8,148	0,13	8,14	8	8,01	8,26	8,33
3	16,066	11,06	24,01	12,94	9,64	1,11	32,63
4	8,116	0,88	7,94	9,46	6,98	7,49	8,71

Taula 19: Resultats Obtinguts en Precisió en Radi, i el seu Promig i la Desviació Típica

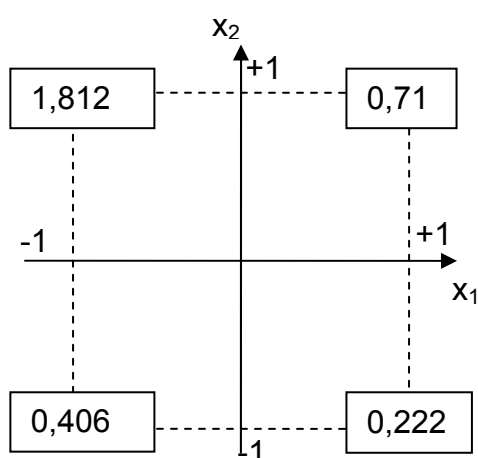


Figura 56: Domini Experimental de Precisió en l'Eix

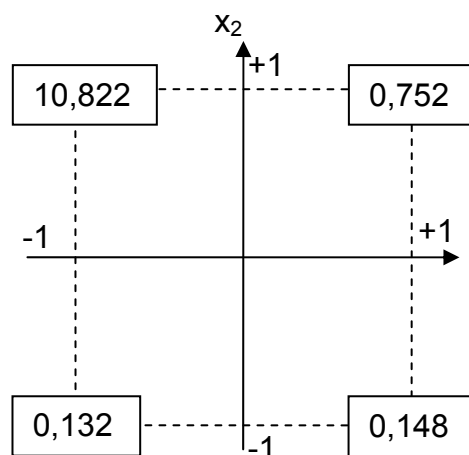


Figura 55: Domini Experimental de Precisió en Radi

5.3.7. Pla d'experimentació

La Taula 13 mostra el Pla d'Experimentació que s'obté en reemplaçar els valors – i + pels valors de les variables reals. També mostra els rendiments obtinguts en realitzar els experiments en ordre aleatori. A les Figura 56 i Figura 55 s'han representat aquests valors en el domini experimental.

Les quatre respostes es poden combinar per obtenir quatre informacions (tantes com experiments): el valor mitjà, dos efectes principals, dos efectes d'interacció de dos factors. La Taula 13 mostra aquestes vuit combinacions. L'ordre en què se sumen i resten les respostes ve donat per la **matriu dels efectes** (també anomenada **matriu del model**) de la Taula 20. Aquesta matriu codificada té tantes files com experiments, i tantes columnes com efectes s'estimaran. Cada efecte es calcula sumant o restant les respostes d'acord amb l'ordre de signes de la seva columna.

Efecte			Valor en Z	Valor en R
Mitjana	b_0	$(+ y_1 + y_2 + y_3 + y_4) / 4$	0,7875	2,9635
Vc	b_{Vc}	$(- y_1 + y_2 - y_3 + y_4) / 4$	-0,3215	-2,5135
fz	b_{fz}	$(- y_1 - y_2 + y_3 + y_4) / 4$	0,4735	2,8235
Vc x fz	$b_{Vc \times fz}$	$(+ y_1 - y_2 - y_3 + y_4) / 4$	-0,2295	-2,5215

Taula 20: Càlculs dels Efectes

La matriu dels efectes es construeix a partir de la matriu d'experiments, afegint columnes pels altres efectes. Per a estimar b_0 s'afegeix una columna de +. Pels efectes d'interacció $Vc \times fz$, s'afegeixen columnes que són el producte (element a element) de les columnes Vc i fz respectivament. La columna de l'efecte d'interacció de tots tres factors és el producte de les columnes Vc i fz. Les noves columnes només indiquen com combinar les respostes per a calcular els efectes. No codifiquen cap variable experimental ni impliquen nova experimentació. Aquest desen-volupament esta exposat a la Taula 21.

	Mitjana	Vc	fz	Vc x fz
1	+	-	-	+
2	+	+	-	-
3	+	-	+	-
4	+	+	+	+

Taula 21: Matriu dels efectes. Velocitat de Tall (Vc) i Avanç per Dent (fz)

5.4. Discussió

Com a resultat s'han obtingut els valors de la Taula 18 i Taula 19. de forma gràfica s'ha realitzat unes fotografies



Figura 57: Proveta Experiment 1



Figura 58: Proveta Experiment 2



Figura 60: Proveta Experiment 3



Figura 59: Proveta Experiment 4

Primer de tot s'ha de destacar que el material d'anàlisi poliestirè expandit (Porexpan®), és un material granulat i de baixa densitat (20kg/m³). També és molt tou i demostra poca resistència a la compressió, fet que no afavoreix una bona precisió dimensional. Les característiques tècniques del Porexpan® estan detallades en l'[annex A.5](#).

Tal com s'aprecia a les fotografies, existeixen una gran diversitat de resultats, molt més destacables en direcció al radi de la fresa.

A avanços per dent reduïts, la precisió és molt satisfactòria, en canvi, a avanços per dent elevats, els resultats no són satisfactoris.

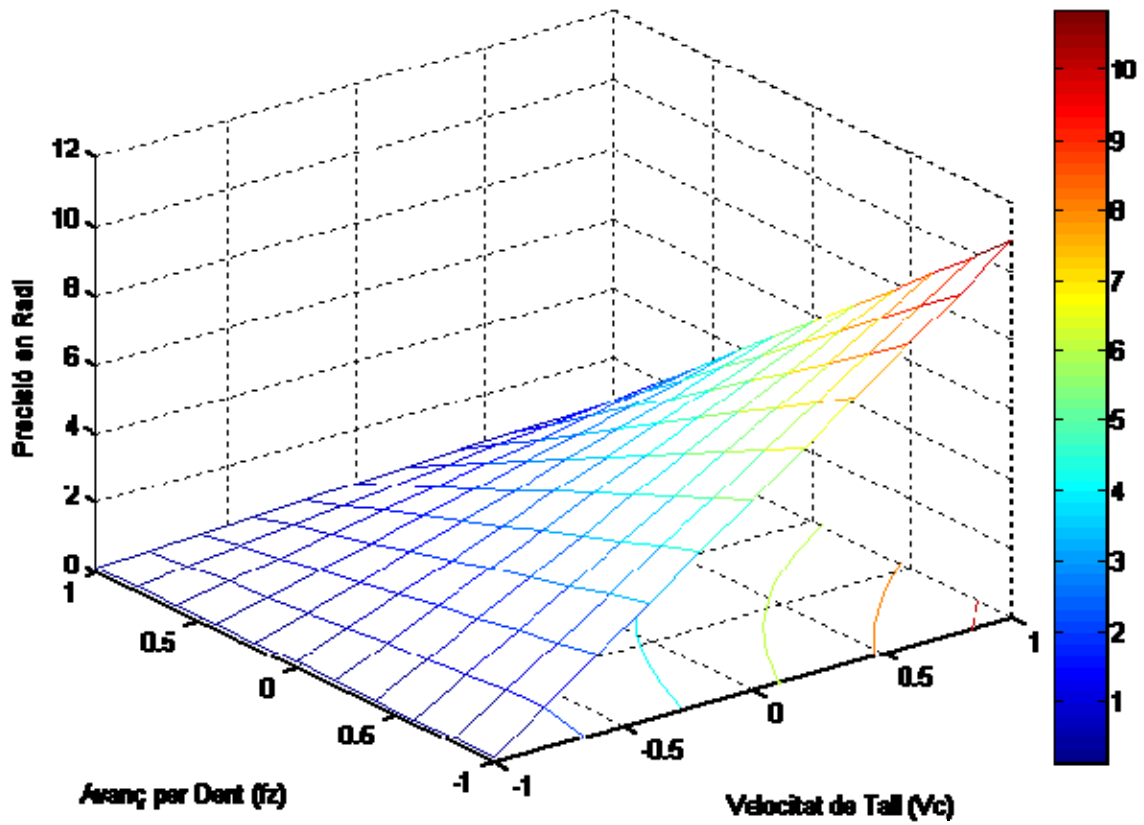
En l'experiment 1 i 2, en avanços per dent reduïts, el sistema produeix precisions molt satisfactòries, i no s'ha arribat a temperatures prou elevades com per arribar a degradar el material. S'ha comprovat que, per a avanços reduïts, i velocitats de gir del capçal elevades es pot arribar a fondre el material, en el cas d'estudi poliestirè expandit, amb greus conseqüències per l'eina i el material (canvi en la geometria de l'eina, pèrdua de les arestes de tall, etc.).

En quant als experiments 3 i 4, es a dir, en avanços per dent elevats, es produeix arrencament del material Porexpan®. Aquest fet és més notable en el cas de l'experiment 3, per tant, a avanços elevats i revolucions reduïdes, on s'arrenquen grups de grànuls de fins a dimensions de 25x11,5mm. Aquest cas aporta una definició de la forma molt reduïda, que només és admissible en processos de desbast groller.

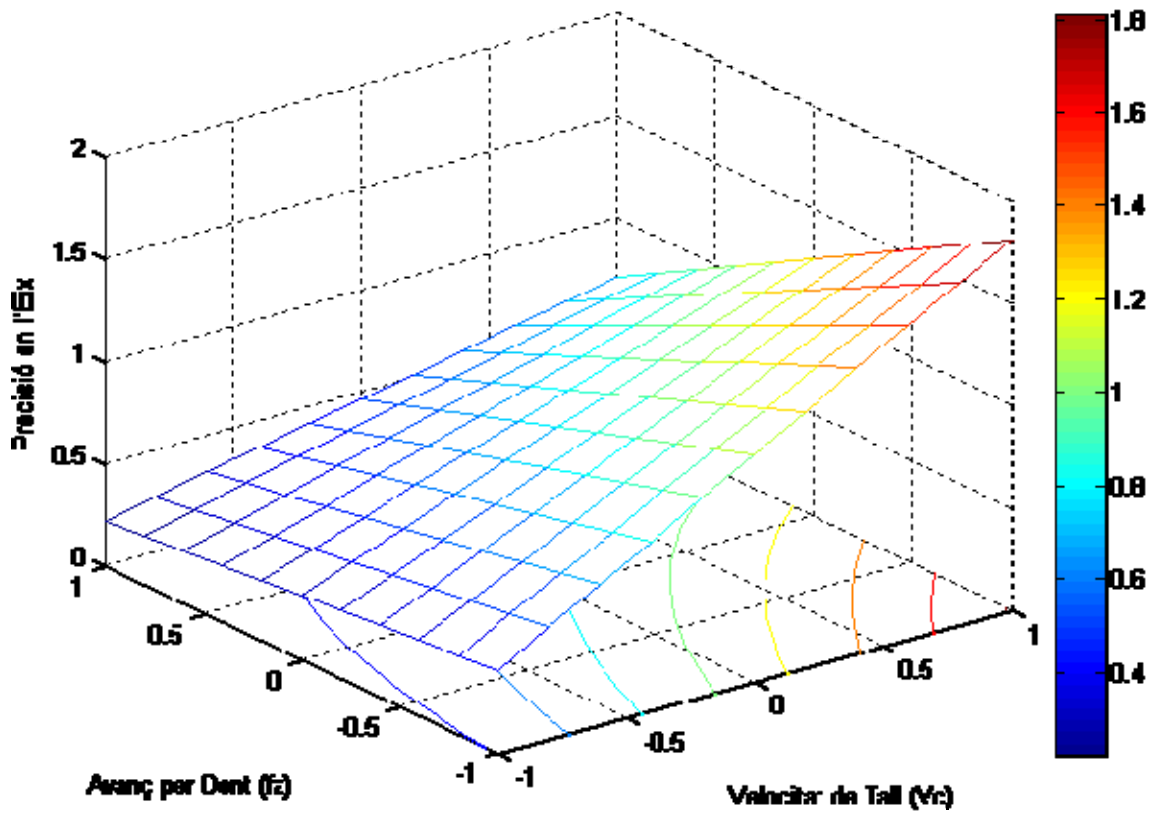
En el cas de l'experiment 3, quan les revolucions són elevades, l'eina de tall arranca grànuls individuals de 4,2mm de promig. Aquestes definicions són admissibles en desbast o quan no es pretenen acabats de qualitat.

S'han determinat uns mapes de precisió, on entrant els paràmetres unitaris s'obtenen les precisions estimades. La Gràfica 12 correspon a les precisions en radi, i la Gràfica 13 correspon a les precisions en l'eix de la fresa.

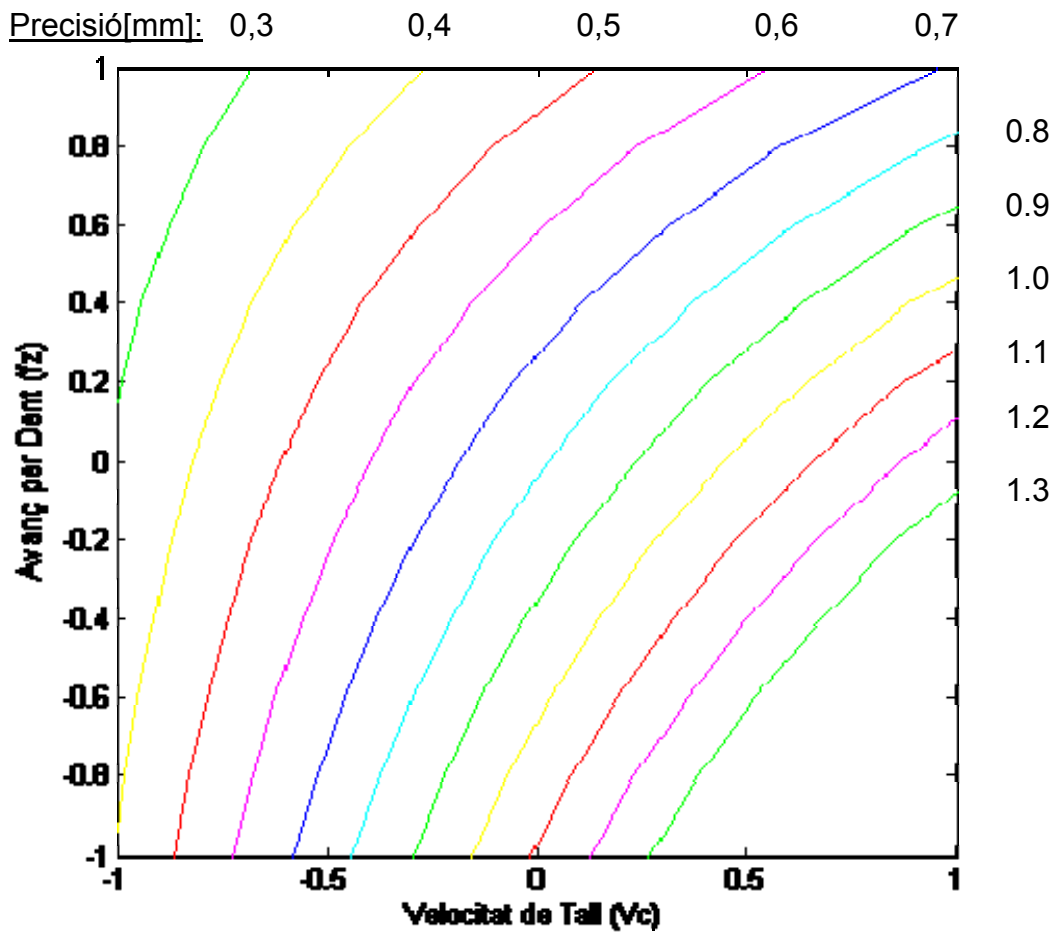
Ahora s'ha inserit els mapes de les corbes d'isoprecisió (Gràfica 14 i Gràfica 15), o es mante una mateixa precisió però diferents relacions de velocitat de tall i avanços per dent. (les 4 gràfiques estan en el domini experimental)



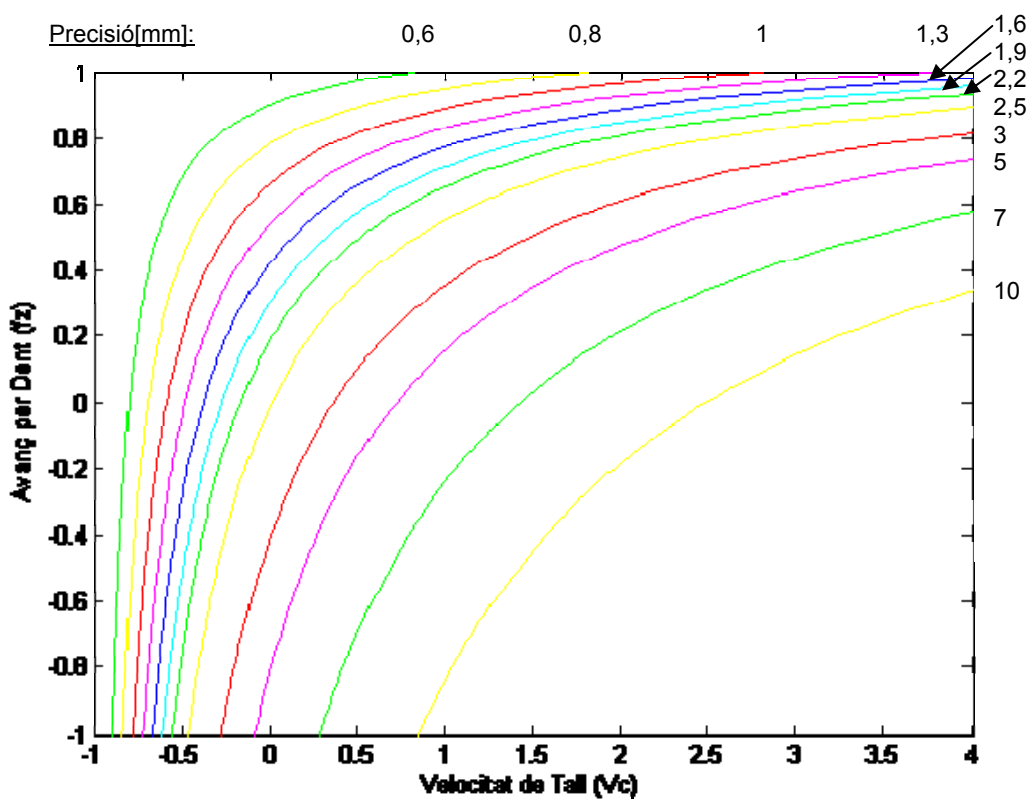
Gràfica 12: Mapa de Precisió en Radi de la Fresa



Gràfica 13: Mapa de Precisió en l'Eix de la Fresa



Gràfica 14: Corbes Isoprecisió en l'Eix de la Fresa



Gràfica 15: Corbes Isoprecisió en Radi de la Fresa

Com a **conclusió** dels resultats, s'estableix:

1. Valor de la **mitjana**, al voltant d'on oscil·len els resultats, són de 0,78mm en l'eix, i 2,96mm en radi
2. Com a **efectes principals** s'estableix que quan l'avanç per dent augmenta, la precisió dimensional disminueix. En quan a la velocitat de tall, quan aquesta augmenta també ho fa la definició. Els valors del factor en eix són $b_{Vc} = -0,32$ i $b_{fz} = 0,47$, i en radi són $b_{Vc} = -2,51$ i $b_{fz} = 2,82$.
3. En els **efectes d'interacció**, quan augmenta el factor d'interacció empitjora la precisió. Els valors de dits efectes són de $b_{Vc \times fz} = -0,23$ en l'eix i $b_{Vc \times fz} = -2,52$ en radi.

El **model** resultant dels experiments és:

$$\text{Precisió en l'eix de la fresa} = 0,78 - 0,32 \cdot Vc + 0,47 \cdot fz - 0,23 \cdot Vc \cdot fz \quad [\text{Eq. 5}]$$

$$\text{Precisió en radi de la fresa} = 2,96 - 2,51 \cdot Vc + 2,82 \cdot fz - 2,52 \cdot Vc \cdot fz \quad [\text{Eq. 6}]$$

La **millor precisió dimensional** assolida és en radi de la fresa, tot i que en general és més precisa eix:

$$\text{Precisió en l'eix de la fresa} = 0,222 \text{ mm} \quad (\text{màxima } Vc \text{ i mínima } fz)$$

$$\text{Precisió en radi de la fresa} = \mathbf{0,132 \text{ mm}} \quad (\text{mínima } Vc \text{ i mínima } fz)$$

A partir d'aquest **model** s'ha creat un **protocol** per al programador de control numèric. Aquest protocol està en el capítol següent.

5.5. Protocol pel Mecanitzat de Porexpan® amb un Robot Antropomòrfic

Era un dels objectius del projecte crear un protocol per tal d'optimitzar el procés per tal de contribuir al desenvolupament industrial.

Com a resultat de l'anàlisi dels resultats s'ha creat un model per tal de saber a priori de realitzar un treball de mecanitzat amb Porexpan® quines precisions s'obtindran. El model es ampliable altres materials, només cal tornar a realitzar l'experiment allà descrit, i el model s'autoajustarà amb els nous resultats. Del nou experiment, se'n poden ajustar tots els paràmetres per tal d'utilitzar altres intervals de funcionament.

A partir del model s'ha creat un protocol de fàcil utilització per al programador del Control Numèric.

En el protocol cal introduir diverses dades del l'eina i del robot, també compta amb dues possibles opcions per introduir les dades referents a les condicions de mecanitzat:

1. Velocitat de tall (V_c) i avanç per dent (f_z), Taula 22
2. Velocitat d'avanç (F) i Velocitat de rotació de l'electromandrí (s), Taula 23

Com a resultat s'obté la precisió esperada, el cabal amb que s'arrenca el material, el rendiment en termes de productivitat i la potència consumida per realitzar el treball.

PROTOCOL 1**Dades: Vc i fz**

CONDICIONS DE TREBALL			
Velocitat de Tall	Vc	750	m/min
Avanç per dent	fz	0,07	mm
Passada en profunditat	a _p	50	mm
passada lateral	a _e	20	% de D
EINA			
Diàmetre eina	D	40	mm
Longitud de tall	Lc	55	mm
nombre de fils de tall	z	6	
MÀQUINA			
Vel. avanç màxima de la màquina		7000	mm/min
Rendiment	η	0,9	tant x 1
MATERIAL			
Força específica de Tall	Kc	27	N/mm ²

Taula 22: Opció 1 del Protocol, Dades d'Entrada Vc i fz

RESULTAT que s' OBTINDRÀ		
Precisió en Z	0,71	mm
Precisió en R	0,752	mm
Productivitat	77,51	%
cabal desbast	3,61	m ³ /h
Potència Consumida	0,50	kW

CONDICIONS DE TREBALL de la MÀQUINA

Velocitat rotació S	5.968,31	rpm
Velocitat avanç F	2.506,69	mm/min
Passada lateral	8	mm

PROTOCOL 2**Dades: F i s**

CONDICIONS DE TREBALL			
Velocitat d'avanç	F	2500	mm/min
velocitat eina, revolucions	s	6000	rpm
Passada en profunditat	a _p	55	mm
passada lateral	a _e	20	% de D
EINA			
Diàmetre eina	D	40	mm
Longitud de tall	Lc	55	mm
nombre de fils de tall	z	6	
MÀQUINA			
Vel. avanç màxima de la màquina		7000	mm/min
Rendiment	η	0,9	tant x 1
MATERIAL			
Força específica de Tall	Kc	27	N/mm ²

Taula 23: Opció 2 del Protocol, Dades d'Entrada F i s

RESULTAT que s' OBTINDRÀ		
Precisió en Z	0,70	mm
Precisió en R	0,68	mm
Productivitat	35,71	%
Cabal desbast	3,96	m ³ /h
Potència Consumida	0,55	kW

CONDICIONS DE TREBALL de la MÀQUINA

Velocitat de Tall Vc	753,98	m/min
Avanç per dent fz	0,07	mm
Passada lateral	8	mm

6. GESTIÓ AMBIENTAL

El Centre Tecnològic Ascamm, on està situada l'estació experimental, compleix amb la normativa mediambiental vigent establerta per la *Generalitat de Catalunya*.

Tots els residus generats durant els assajos són gestionats segons el *Catàleg de Residus de Catalunya*. Estan estipulats com:

- *partícules plàstiques* procedents de *mecanitzats, poliments, rectificats i acabats de superfícies*, amb el codi 120102.
- *retalls, peces, cagaferros, llimadures, granalla i partícules metàl·liques* procedents de *la indústria del ferro i de l'acer*, amb el codi 100203.

Els residus de poliestirè expandit, de la firma *Porexpan®*, han estat valoritzats per la empresa *Dinamicpallet S.L.*

Dades empresa:

Nom del contacte: Ruben Puertas Lorente

Dinamicpallet S.L.

Passeig de la font pudenta, 14

08110 Moncada i Reixac

7. PRESSUPOST

S'han realitzat dues valoracions econòmiques:

S'ha realitzat un **pressupost de la realització de l'experiment**, Taula 24, on s'inclouen totes les tasques per tal de dur a terme l'experiment tal com ho fa una empresa. També s'inclouen totes les hores de realització del treball, com són les de redacció i recerca d'informació.

També s'ha realitzat un **pressupost per l'adquisició i la instal·lació de l'immobilitzat**, Taula 25.

ELEMENT	QUANTITAT [hores]	PREU UNITARI	PREU TOTAL[€]
PERSONAL			14040
Recerca Informació	120	36	4320
Redacció del projecte	180	36	6480
Disseny, execució i anàlisi de l'Experiment	90	36	3240
ÚS DE L'ESTACIÓ			1600
Set-up		1	500
Hores màquina	8	100	800
Desgast eines		1	300
MATERIAL			200
Porexpan® 20kg/m3	4 unitats	50	200
TOTAL			15840

Taula 24: Pressupost del Projecte de l'Experiment

ELEMENT	MARCA	MODEL	QUANTITAT	PREU UNITARI	PREU TOTAL[€]
ESTACIÓ EXPERIMENTAL					88200
robot	ABB	IRB 6640	1	30000	30000
controlador robot	ABB	IRC 5	1	20000	20000
mandrí	HSD	ES919	1	6000	6000
controlador mandrí	KEB COMBIVERT	Combivis5 i CPmod	1	5000	5000
plat divisor	KITAGAWA		1	12000	12000
portaeines	Laip	diversos	4	300	1200
gàbia seguretat			1	6000	6000
integració (posta en marxa i muntatge)			1	8000	8000
EINES					1917,42
eina 1	CERIN	64L	1	128,84	128,84
eina 2	CERIN	64RL	1	359,83	359,83
eina 3	CERIN	62RL	1	61,77	61,77
eina 4	CERIN	62R	1	148,22	148,22
eina 5	FETTE	KHSS-E933	1	430	430
eina 6	FETTE	E-25278	1	420	420
eina 7	CLARKSON	280.924	1	25,03	25,03
eina 8	NACHI	HSS-Co 14	1	98,72	98,72
eina 9	GARANT	STG6555HSS-CO8	2	48,31	96,62
eina 10	MISHUBISHI	VC-MDR8 10	1	34,28	34,28
eina 11	MISHUBISHI	VC-MDR8 5	1	22,36	22,36
eina 12	KOBELCO	KHA F9	1	31,75	31,75
eina 13	Construcció	Propia d20	1	20	20
eina 14	Construcció	Propia d40	1	40	40
TOTAL					90117,42

Taula 25: Pressupost i Instal·lació Estació Robot

8. CONCLUSIONS

Es necessari valorar les dues activitats primordials del projecte: la instal·lació i integració dels sistemes, amb la construcció d'una estació robotitzada, i per l'altre banda els experiments realitzats.

La **integració dels sistemes** s'ha realitzat molt satisfactòriament. Actualment al Centre Tecnològic Ascamm hi ha una estació robotitzada apte per a l'ús i la recerca.

S'ha valorat la problemàtica del fet de dur a terme la tasca de mecanitzar amb robots antropomòrfics, que no havia estat estandarditzada fins ara.

Pel que fa als **experiments realitzats** amb el robot i l'electromandrí, per tal de mecanitzar materials tous, el cas del present estudi Porexpan®, s'han extret models per definir la precisió dels conjunt dels elements, tant en l'eix de la fresa com en la direcció radial, a partir de les condicions de treball del sistema.

S'ha establert que la millor **precisió** és de **0,132mm**, fet que es pot considerar un resultat excel·lent tenint en compte el tipus de màquina.

Amb el **model empíric** s'ha establert un **protocol** que serveix per ajustar de forma simple els paràmetres de funcionament de l'estació de mecanitzar robotitzada. Aquest protocol està dirigit a programadors de Control Numèric amb robots antropomòrfics, tan sigui en fresat de 3, 5 o 6 eixos.

A més a més, s'ha dut a terme una **valoració econòmica** de la realització de l'estudi, i per altre banda de l'adquisició i instal·lació de l'immobilitzat.

A partir d'aquest projecte, s'obren les portes a futures recerques, com poden ser les condicions per mecanitzar fusta, pastamaster o fins hi tot alumini.

9. VALORACIONS PERSONALS

Primer de tot concloure que s'han assolits tots els objectius fixats en la realització del projecte. Tanmateix hom està molt satisfet pel projecte aquí presentat, com pels coneixements adquirits durant la seva realització.

La complexitat i la profunditat del projecte mereixen una menció especial, ja que s'ha realitzat una tasca completament pluridisciplinar:

- Recerca informació i adquisició de coneixements
- Relació estreta amb l'indústria, dirigint aquest projecte a la transferència de coneixement i al desenvolupament de l'indústria de la producció
- Ús de software especialitzat
- Integració de sistemes, amb tot el coneixement que aquest fet implica
- Disseny i execució d'experiment i control de qualitat
- Enginyeria de mecanitzat
- Gestió de recursos i planificació
- En Robòtica i Mecatrònica
- Valoracions econòmiques

Aquest és el projecte que culmina amb la meva carrera acadèmica d'Enginyeria Industrial, del que n'estic molt orgullós.

10. AGRAÏMENTS

Indubtablement agrair al meu pare i ma mare, en Manel i na Marta, tot el suport i comprensió durant la realització del projecte i en la vida en general.

La menció més especial se la mereix la meva companya en la vida, ja que sempre s'ha prestat a ajudar i mantenir la meva "cordura mental".

Al company de feina Felix, per ajudar-me i ensenyar-me tantes coses, i fer que la feina no sigui un lloc pesat i avorrit.

Al professor de la Universitat Politècnica de Catalunya, Jose Antonio Ortiz , no només pel bon fer que ha tingut durant la realització del meu PFC, sinó també per la seva actitud com a professor i com a persona.

Al meu cap en el Centre Tecnològic Ascamm, en Jordi Ribatallada, ja que m'ha permès de realitzar un projecte ambiciós i rigorós. Valorar molt especialment la seva competència i bon tracte.

Al meus amics que tenien molta paciència amb mi, ja que aguantaven el fet que sempre que sortia de casa, era amb l'ordinador sota el braç per tal de seguir treballant.

11. BIBLIOGRAFIA

Per a la realització d'aquest treball s'han consultat fonts de diversa naturalesa. Per anomenar les fonts s'utilitza una lletra majúscula que defineix la naturalesa de la font, i un nombre aràbic que distingeix la font.

Apunts

- [A.1] Assignatura CONTROL DE QUALITAT I DISSENY D'EXPERIMENTS de la *Universitat Politècnica de Catalunya*, impartida per Montserrat Pepio del *Departament d'Estadística en l'enginyeria*. Apunts del curs 2008-09

- [A.2] Assignatura GESTIONE DI LA QUALITÀ de la universitat *Politecnico di Torino*, impartida pel professor Fausto Galletto del *Dipartimento di l'Amministrazione di la Azienda*. Apunts del curs 2008-09.

- [A.3] Assignatura INTELLIGENT ROBOTICS de la *University of Wales* impartida per Joanne Walker del *Department of Computer Science*. Apunts del curs 2008-09. (<http://users.aber.ac.uk/jnw/CS364/5.php>)

- [A.4] Assignatura ROBOTICA de la universitat *Politecnico di Torino*, impartida pel professor Basilio Bona del *Dipartimento di Automatica e Informatica*. Apunts del curs 2007-08 i 2008-09.

- [A.5] Assignatura PROCESSOS DE CONFORMACIÓ de la *Universitat Politècnica de Catalunya*, impartida per Jose Antonio Ortiz i Xavier Saluenya del *Departament d'Enginyeria Mecànica*. Apunts del curs 2006-07

- [A.6] Assignatura ROBÒTICA INDUSTRIAL de la *Universitat Politècnica de Catalunya*, impartida per Pere Ponsa del *Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial*. Apunts del curs 2008-09. (<http://biblioteca.upc.es/Factoria/arxius/67/web/index.htm>)

Llibres

- [L.1] *Catàleg eines per a la indústria, Mishubishi.* 2008
- [L.2] *Diccionari de la llengua catalana.* Segona edició. *Institut d'Estudis Catalans.*
<http://dlc.iec.cat> 27/8/2009
- [L.3] *Industrial robotics handbook.* de V. Daniel Hunt. Editor *Industrial Press Inc.*, 1983.
<http://books.google.es/books?id=7od4alFKfNMC&dq> 20/5/2009
- [L.4] *Información Tecnológica.* Volum 8 nº2. Editor Jose O. Valderrama. 1997. *Centro de Informacion Tecnologica*
- [L.5] *Manufactura, ingeniería y tecnología* quarta edició. Kalpakjan i Schmid, Edotorial *Person Educación.* 2002.
http://books.google.es/books?id=qilYI9_KKAoC&pg 4/6/2009
- [L.6] *Robot technology and applications.* de Ulrich Rembold. Editorial *CRC Press.* 1990.
<http://books.google.es/books?id=qlHaT-pXyVgC&dq> 10/6/2009
- [L.7] *Tecnología de los metales para profesiones técnico-mecánicas.* Hans Appold. Editorial *Reverte,* 1994. <http://books.google.es/books?id=e0h1WvbEpYC&dq> 20/5/2009 – 5/6/2009
- [L.8] *The effect of kinematic model complexity on manipulator accuracy*
Mooring, B.W.; Padavala, S.S. *Robotics and Automation,* 1989. *Proceedings., 1989 IEEE International Conference on Volume , Issue , 14-19 May 1989 Page(s):593 - 598 vol.1*
- [L.9] *User Guide for the Procedural Reasoning System ,* K. L. Myers, Technical Report, Artificial Intelligence Center, Technical Report, SRI International, Menlo Park, CA, 1997.

Treballs

- [T.1] *Control de posició i força d'un braç robot industrial. Aplicació a la inserció de cilindres.* Raül Valls Albert. Master thesis. *Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial (UPC)*
- [T.2] *Diseño, construcción y control PD con compensación de pares gravitacionales de un robot manipulador didáctico.* Carlos A. González Gutiérrez (http://www.uvmnet.edu/investigacion/episteme/numero6-06/reportes/a_control.asp)
- [T.3] *Disseny i constructor d'un minirobot rastrejador.* Jordi Martí i Josep Malavé. Treball Final de Carrera a l'EUETIB (UPC)
- [T.4] *Disseny i implementació d'un banc d'assaig automàtic per la maquinabilitat de materials.* Laura Vendrell Mateu. Master thesis. *Departament Enginyeria Mecànica (UPC)* [Problemàtica de l'ús de robots per a mecanitzar, maquinabilitat]
- [T.5] *Eina de Modelat de mons virtuals mitjançant objectes convexes. Aplicació al modelat i simulació de tasques robotitzades.* Lluís Geseni Casanova. Projecte Final de Carrera ETSEIB (UPC)
- [T.6] *Estudi de la millor estratègia d'alimentació d'una cel·la robotitzada amb màquines treballant en paral·lel.* Laia Pont i Martí. Projecte Final de Carrera ETSEIB (UPC)
- [T.7] *Robotica y Aplicaciones.* Ana María González i Mauricio Espina. (<http://www.monografias.com/trabajos10/robap/robap.shtml>) [tipus de robots] i [generacions de la robòtica]
- [T.8] *Simulador cinemàtic per a l'aprehensió destral d'objectes.* Xavier Sierra Contreras. Projecte Final de Carrera. *Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial (UPC)*

Planes web a Internet

- [W.1] <http://dialnet.unirioja.es/> plana web de Tesis doctorals, revistes, i d'informació científica. 4/4/2009
- [W.2] www.upcommons.upc.edu plana web de treballs de la UPC. 2/3/2009 – 10/8/2009
- [W.3] www.dmgamerica.com fabricant de maquinària de mecanitzat per control numèric. 27/5/2009
- [W.4] www.directindustry.com proveïdor de productes per a l'indústria. 2/3/2009 – 10/8/2009
- [W.5] <http://www.industrial-electricity.com/images/14-2.jpg&imgrefurl> 16/4/2009.

- [W.6] <http://www.staubli.com/en/robotics/> empresa de robòtica industrial STÄUBLI. 26/4/2009
- [W.7] http://www.kuka-robotics.com/spain/es/products/industrial_robots/ empresa fabricant de robòtica KUKA. 28/4/2009
- [W.8] <http://www.fanucrobotics.es/home.asp> fabricants de robots FANUC. 5/5/2009
- [W.9] <http://www.mastercam.com/> web oficial dels fabricat de MasterCam. 12/6/2009
- [W.10] <http://www.robotmaster.com/index.php> web oficial dels fabricat de RobotMaster. 12/6/2009
- [W.11] <http://www.fagorautomation.com/> web oficial de fabricant de sistemes d'automatitzacions i Control Numèric FAGOR. 12/4/2009
- [W.12] <http://www.heiderhain.es> web oficial de fabricant de sistemes de medicció i Control Numèric HEIDERHAIN. 12/4/2009
- [W.13] <http://www.dynalog-us.com> Calibradors de robots DYNALOG. 21/6/2009
- [W.14] www.pushcorp.com/success.htm Empresa integradora de sistemes d'automatitzacions PUSH CORP. 27/6/2009
- [W.15] http://cfievalladolid2.net/tecno/ctrl_rob/robotica/historia.htm pàgina web sobre la robòtica. 11/4/2009
- [W.16] www.geocities.com/soldadura17/rob/introrob.htm web de robòtica. 21/4/2009
- [W.17] www.thocp.net/reference/robotics/robotics2.htm web d'història de la robòtica. 26/6/2009
- [W.18] www.mitutoyo.com web de l'empresa Mitutoyo d'aparells de mesura. 16/8/2009
- [W.19] www.viquipèdia.org enciclopèdia lliure VIQUIPÈDIA. 25/3/2009 – 21/8/2009
- [W.20] www.abb.com empresa constructora de material per l'indústria i robots ABB 4/9/2008 – 4/9/2009

Material Audiovisual

- [V.1] YouTube. *Ninot equilibrista en monocicle*
<http://www.youtube.com/watch?v=nUxKftxg5oE&NR=1>. 2009

- [V.2] YouTube. *peix-robot* <http://www.youtube.com/watch?v=eO9oseiCTdk&NR=1>. 2009
- [V.3] YouTube. *big dog* http://www.youtube.com/watch?v=4oMTKuzc_M. 2009
- [V.4] YouTube. *exosquelet* <http://www.youtube.com/watch?v=Nhj3Z9o6t0g&feature=related>. 2009
- [V.5] YouTube *robot Kuka per entrenament de surf*.
<http://www.youtube.com/watch?v=IYlu8px8b1l&NR=1>. 2009
- [V.6] YouTube. *Robot Fanuc amb un home al TCP*
<http://www.youtube.com/watch?v=IIRbUHVjP7Q>. 2009
- [V.7] YouTube. *Robot Comau amb laser al TCP*
<http://www.youtube.com/watch?v=IP66CbvvxS4>. 2009
- [V.8] YouTube. *Robot per mecanitzant Porexpan*
<http://www.youtube.com/watch?v=1JcvCZFG0L0&feature=related>. 2009
- [V.9] YouTube. *Robot Nachi manipulant un xassís de cotxe*
<http://www.youtube.com/watch?v=PUZ8Oa2Lb2k&feature=related>. 2009
- [V.10] YouTube. *Robot mecanitzant un bust de Beethoven*
<http://www.youtube.com/watch?v=UjMJOfCyDaA&feature=related>. 2009
- [V.11] YouTube. *Robot mecanitzant la cara d'una dona*
<http://www.youtube.com/watch?v=euo8IKf2CuQ&feature=related>. 2009
- [V.12] YouTube. *Robots Kuka fent una exhibició*
<http://www.youtube.com/watch?v=BmFPIZU-cvc&NR=1&feature=fvwp>. 2009

Normatives ISO

ISO 9283:1998 Manipulating industrial robots -- Performance criteria and related test methods

ISO 230-2:2006 Test code for machine tools -- Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes

ISO 230-7:2006 Test code for machine tools -- Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation

ISO 3070-1:2007 Machine tools -- Test conditions for testing the accuracy of boring and milling machines with horizontal spindle -- Part 1: Machines with fixed column and movable table

ISO 3070-2:2007 Machine tools -- Test conditions for testing the accuracy of boring and milling machines with horizontal spindle -- Part 2: Machines with movable column and fixed table

ISO 3070-3:2007 Machine tools -- Test conditions for testing the accuracy of boring and milling machines with horizontal spindle -- Part 3: Machines with movable column and movable table

ISO 1701-1:2004 Test conditions for milling machines with table of variable height -- Testing of the accuracy -- Part 1: Machines with horizontal spindle

ISO 1701-2:2004 Test conditions for milling machines with table of variable height -- Testing of accuracy -- Part 2: Machines with vertical spindle

ISO 14649-11:2004 Industrial automation systems and integration -- Physical device control -- Data model for computerized numerical controllers -- Part 11: Process data for milling

ISO 15641:2001 Milling cutters for high speed machining -- Safety requirements

ISO 8636-1:2000 Machine tools -- Test conditions for bridge-type milling machines -- Testing of the accuracy -- Part 1: Fixed bridge (portal-type) machines

ISO 8636-2:2007 Machine tools -- Test conditions for bridge-type milling machines -- Testing of the accuracy -- Part 2: Travelling bridge (gantry-type) machines