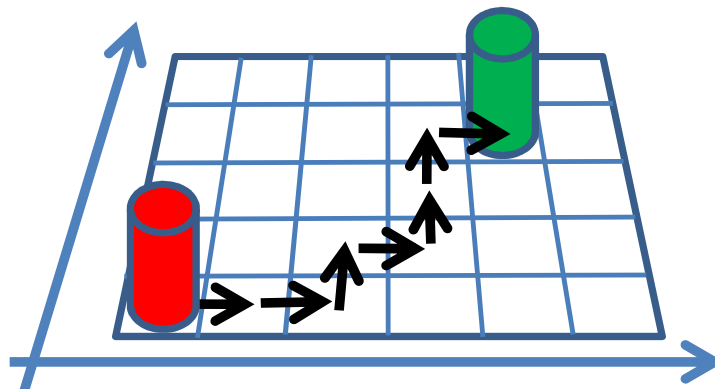




TESI DOCTORAL:

Contribució als algorismes de construcció de models del món per a la implementació en Arquitectures Àgils de Fabricació



Autor: Joaquim Minguella i Canela

Director de Tesi: Dr. Joan Ramon Gomà i Ayats

Co-Directora de Tesi: Dra. Irene Buj i Corral

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Tesi presentada per a obtenir el títol de Doctor per la Universitat Politècnica de Catalunya

TESI DOCTORAL:

**Contribució als algoritmes de construcció de
models del món per a la implementació en
Arquitectures Àgils de Fabricació**

Autor: Joaquim Minguella i Canela

Director de Tesi: Dr. Joan Ramon Gomà i Ayats

Co-Directora de Tesi: Dra. Irene Buj i Corral

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Tesi presentada per a obtenir el títol de Doctor per la Universitat Politècnica de Catalunya

Agraïments

La realització de la present Tesi Doctoral ha estat un procés llarg i que no ha estat exempt de dedicació, esforç, treball i voluntat. És evident doncs, que un fet com aquest no succeeix sense un context que li aportí il·lusió, disposició, ànim i esperit de superació.

En primer lloc vull agrair als meus Directors de Tesi, Joan Ramon Gomà i Irene Buj, que han sabut guiar-me en el camí del Doctorat. Amb la mateixa intensitat, vull agrair al Catedràtic Joan Vivancos que fes possible que pogués començar-lo i desenvolupar-lo i sobretot que sempre hagi estat a prop per tot el que m'ha calgut. De manera més extensiva però molt personal, també vull agrair als companys i companyes del Departament d'Enginyeria Mecànica que m'hagin donat empenta per culminar un treball merescut: Cayetano, Salvador, Tania, Jordi, Lluïsa, Ramón, Àlex, Lluís, Joan, Miquel, Daniel, Enrique, Joaquim M., Laia, Pau, Matteo, Josep Maria, Anna i també Jordi, Jose, Imma, Maribel i Hilda. Gràcies per haver confiat sempre en mi i per ajudar-me en tot allò que he necessitat.

D'altra banda, vull agrair als meus companys i companyes del Centre CIM que m'hagin ofert les millors oportunitats que se li han pogut donar mai a ningú: Felip, Roger, Jaume, Eli, Minerva, Sandra, Vane, Juan Vicente, Tomeu, Marta, Daniel, Jaume, Agus, Javier, Manolo, Bernat, Gerard, Eric, Guillem, Sergi, Albert, Enric, Eva, Rosana, Arnau, Rosa M^a, José Manuel, Albert, Adri, Maties, Pau, Ricard, David, Javier, Phillipinne, Alcides, Salomé, José Miguel, Jordi, Edu, Adèle, Juana, Xenofon, Paqui i també Rafael. Alguns companys, fins i tot, com l'Albert A. o en Juan A. que ara ja no són al Centre sinó que han emprés la seva carrera professional en altres destins, ajudant-me amb un compromís especial –quasi personal diria-, per poder assegurar que tot tingués la forma que era de menester. Si us plau, no oblideu mai que sou els i les millors.

Finalment, i d'una manera molt especial, vull donar un càlid agraïment a la meva família i als meus amics per haver estat sempre al meu costat i que no m'hagin fet dubtar ni un moment de la importància de lluitar pel que realment és important. De manera especial, vull agrair-li al meu pare la integritat i les idees clares; a la meva mare la cultura de l'esforç i la resiliència; al meu tiet Jaume, l'esperit de lluita i millora; a la meva germana, la persistència i la professionalitat, al meu cosí Daniel, la honestedat i el gust per les coses ben fetes i a la Marina la seva força i el seu suport incondicional que ens han portat recentment a ampliar la família amb un petit nou membre. En definitiva, a tots i totes gràcies per haver fet real el que molta gent busca durant tota la seva vida.

Aquest treball és doncs la síntesi d'un entorn, d'un context. Vull donar un agraïment especial a qualsevol persona o entitat que directa o indirectament hagi pogut contribuir a la realització d'aquest treball. A tots i a totes, moltes gràcies: res de tot això hauria estat possible sense vosaltres.

Tesi Doctoral Joaquim Minguella i Canela

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

***Qui perd els orígens ([EO_i]),
perd la identitat ([ψ], [Ω])***

Dita popular catalana

Índex

Resum.....	xiii
Abstract.....	xv
Resumen.....	xvii
Nomenclatura.....	xix
Capítol 3. Exploració de Sistemes Binaris segons l'algoritme de Gomà i Vivancos....	xix
Capítol 4. Exploració d'algoritmes en Sistemes Binaris	xix
Capítol 5. Exploració d'algoritmes en Sistemes amb variables Binaries i Contínues.....	xxi
.....	xxi
Capítol 1. Introducció.....	1
1.1. Plantejament general.....	1
1.2. Model lògic de comportament de sistemes intel·ligents.....	2
1.3. Objectius de la Tesi.....	4
1.3.1. Objectius generals.....	4
1.3.2. Objectius específics	5
1.4. Metodologia.....	5
1.5. Estructura de la Tesi	6
1.6. Publicacions realitzades en el Marc de la Tesi.....	6
1.6.1. Publicacions realitzades sobre Sistemes de Fabricació Intel·ligent.....	6
1.6.2. Publicacions realitzades sobre casos específics de desenvolupament de producte	8
1.6.3. Contribucions en Informes de Prospectiva	10
1.7. Abast i contribució de la Tesi	10
Capítol 2. Estat de l'art.....	11
2.1. Estacions de Treball de configuració ràpida.....	11
2.1.1. Introducció a les Tecnologies "Agile Manufacturing". Naixement del Concepte de la Fabricació Àgil	11
2.1.2. Característiques presents en els sistemes de configuració ràpida.....	12
2.2. Eines aportades per les diferents disciplines de la IA.....	15
2.2.1. Disseny intel·ligent de Cèl·lules de Fabricació Flexible (FMS).....	16
2.2.2. Planificació Intel·ligent d'operacions de muntatge.....	18

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

2.2.3. Construcció de teories de l'entorn i de sí mateixos: Aprenentatge i Comportament de sistemes intel·ligents.....	19
2.3. Implementacions en cèl·lules de fabricació altament flexibles.....	22
2.3.1. Estudis tècnics de Recerca i Desenvolupament sobre Fabricació Àgil.....	22
2.3.2. Materialització d'Estacions de Muntatge Àgils basades en la interacció de sistemes complexos.....	23
2.4. Algoritmes d'optimització. Projectes sobre plataformes autònomes d'experimentació.....	29
2.4.1. Optimització de moviments en un espai d'estats: Algoritmes de camí mínim.....	29
2.4.2. Plataformes autònomes d'experimentació per al descobriment de Models de Conducta.....	31
Capítol 3. Exploració de Sistemes Binaris segons l'algoritme de Gomà i Vivancos.....	33
3.1 Construcció de models del món teòrics a partir d'experiments (Gomà i Vivancos ^[3]).....	33
3.2 Programació de l'algoritme de Gomà i Vivancos ^[3] en sistemes binaris.....	34
3.2.1 Especificacions: Tipus d'accionaments, tipus de sensors i nomenclatura.....	35
3.2.2. Consideracions sobre la modelització dels diferents elements (accionaments i sensors).....	38
3.3 Experimentació i resultats de la utilització dels algoritmes.....	38
3.3.1. Definició dels Casos d'Aplicació.....	39
3.3.2. Resultats experimentals.....	42
3.3.3. Reflexions i Corol·laris sobre l'algoritme de Gomà i Vivancos.....	47
Capítol 4. Exploració d'algoritmes en sistemes binaris.....	49
4.1. Definició de l'entorn de treball, restriccions i objectius del sistema.....	49
4.2. Construcció de Models del Món i assoliment d'estats.....	51
4.3. Implementació segons <i>Visual Studio</i> ®.....	55
4.4. Estratègies d'Exploració.....	58
4.4.1. Algoritme d'Exploració Exhaustiva (Exploració Lliure).....	58
4.4.2. Algoritme d'Exploració no Exhaustiva (Exploració per Objectius).....	59
4.4.3. Tractament de Fronteres i Carrerons sense sortida.....	61
4.4.4. Exemple d'Exploració amb Algoritme no Exhaustiu.....	62
4.5. Etapa d'Execució de Tasques.....	64
4.5.1. Algoritmes d'Execució de Tasques.....	64
4.5.2. Avaluació de Costos de Solucions.....	67

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

4.5.3. Aplicació de Prejudicis	68
4.5.4. Exemple pràctic de l'Etapa d'Execució de Tasques	71
Capítol 5. Exploració d'algoritmes en sistemes amb variables binàries i contínues	73
5.1. Definició de sistemes amb variables contínues	73
5.2. Implementació segons <i>Visual Studio</i> ®	74
5.3. Definició d'estratègies	75
5.4. Experimentació. Resultats. Altres funcionalitats	76
5.4.1. Altres moviments d'actuació. Actuació en sentit contrari a l'habitual.....	76
5.4.2. Tractament d'Obstacles: fixos, mòbils o eliminables.....	77
5.4.3. Tractament de la connexió entre punts de la retícula 2D. Fronteres i "Forats de cuc"	78
5.4.4. Accionaments no controlats però amb influència sobre el sistema.....	80
Capítol 6. Extensió a topologies diverses de Màquines i Cèl·lules de Fabricació Flexible....	81
6.1. Formes de Programació i Aprenentatge Automàtic. Requisits de Funcionament i Requisits Industrials.....	81
6.1.2. Requisits de Programació en Arquitectures Àgils de Fabricació.....	83
6.1.3. Requisits Industrials dels sistemes de Fabricació Intel·ligent	84
6.2. Màquines-Eina per a la Fabricació mitjançant l'arrencament d'encenalls (Fabricació Sostractiva) i Sistemes de Deposició de Material (Fabricació Additiva)	85
6.2.1. Materialitzacions a l'entorn de la Tesi Doctoral	88
6.3. Cèl·lules de Fabricació Flexible per a operacions de muntatge	92
6.3.1. Implementació d'Arquitectures Àgils de Fabricació per a operacions complexes de muntatge de components.....	95
Capítol 7. Conclusions i Treballs Futurs.....	101
7.1. Conclusions.....	101
7.2. Context Present: Sistemes CAM actuals per a la generació de trajectòries 3D.....	104
7.3. Treballs futurs	105
7.3.1. Implementació d'Algoritmes de construcció de models del món en sistemes àgils de Fabricació: el CAM intel·ligent.....	105
7.3.2. El món tancat s'està acabant: els "Makers" i la comunitat oberta	107
7.3.3. Extensió a altres topologies: La democratització dels sistemes de producció	108

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Annex 1. Suport informàtic per a l'Aplicació de l'algoritme de Gomà i Vivancos.....	113
A1.1. Modelització de sistemes mitjançant eines de programació.....	115
Annex 2. Continguts i utilització del Programari " <i>Espai d'Estats</i> "	119
A2.1. Principals funcionalitats pràctiques del programari.....	119
A2.1.1. Configuració de Paràmetres	119
A2.1.2. Etapa d'Exploració del Món: Construcció de Models del Món inicials	120
A2.1.3. Etapa d'Execució de Tasques: Resolució de casos aplicant i millorant els models lògics	121
A2.2. Estructura d'implementació realitzada.....	122
A2.3. El Contingut darrere del Programa: Funcionalitats que donen suport a l'aplicació principal.....	125
A2.3.1. Formulari d'Ajuda	125
A2.3.2. Importació i Exportació d'Arxius.....	126
A2.3.2. Gestió d'Errors i Excepcions. Depuració del Programa.....	127
A2.3.3. Selecció d'Idioma.....	128
A2.3.4. Incorporació de noves funcionalitats. Desenvolupament ulterior dels algoritmes per part de la Comunitat de programari lliure i obert.....	129
Annex 3. Programació d'eines dedicades a la Fabricació i a la selecció intel·ligent de sistemes de Fabricació.....	131
A3.1. Utilització de diferents Plataformes i entorns de disseny.....	131
A3.2. Funcionalitats, premisses de disseny.....	132
A3.3. Confecció de la Base de Dades (Base de Coneixement).....	134
A3.4. Aplicacions i usabilitat: El factor humà.....	146
A3.5. Exemples d'eines dedicades a la selecció intel·ligent de sistemes de Fabricació.....	148
A3.5.1. <i>RMADS</i> : El programari de <i>MAQMA</i>	148
A3.5.2. <i>Selectool</i> : Selecció d'eines de tall.....	150
Annex 4. Fabricació en massa de béns personalitzats. Fabricació Poc Convencional.....	153
A4.1. Fabricació del Segle XXI: Principals reptes i oportunitats.....	153
A4.2. Enginyeria Concurrent i Anàlisi Integral del Cicle de Vida del Producte	156
A4.3. Resposta als reptes de fabricació particularitzada a sectors i àmbits concrets d'aplicació	159
A4.3.1. El cas Biomèdic.....	159

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

A4.3.2. El cas de la Joguina.....	166
A4.3.3. El cas dels Productes de Consum.....	169
Annex 5. Sistemes de fabricació intel·ligent lliures i oberts	175
A5.1 Moviments en matèria de Sistemes de fabricació Lliures i Oberts. <i>RepRap</i> : La Comunitat “ <i>Maker</i> ” de la impressió 3D.....	175
A5.2 Sistemes de fabricació locals per a un món global. El cas RepRapBCN de la Fundació CIM	177
A5.3 Programari lliure i obert per a Sistemes de fabricació. El cas Slic3r	181
Bibliografia i fonts consultades.....	185

Resum

Des de la primera introducció de sistemes de Control Numèric per Computador (CNC) en màquines-eina i sistemes de fabricació (documentada l'any 1940), les tecnologies de fabricació assistides per ordinador han aconseguit un estadi de maduració fins al punt que ja no es pot concebre processos de producció avançats si no estan governats per una integració informàtica.

Amb el temps, els nous sistemes i màquines han incorporat millores revolucionaries que han permès assolir quotes de productivitat, eficiència i qualitat que permeten obtenir productes quasi de ciència ficció. Malgrat això, la majoria de sistemes de fabricació treballen amb arquitectures de control completament deterministes en els quals el CNC només s'utilitza per a realitzar feines numèriques pesades en mode automàtic i només en comptades ocasions s'utilitza per realitzar computacions "veritablement intel·ligents".

Els nous paradigmes de la Fàbrica del Futur apunten cap a l'ús de noves configuracions de treball anomenades "Arquitectures Àgils de Fabricació", en les quals cal necessàriament capacitar els sistemes amb intel·ligència per poder desplegar capacitats com la *Resposta Ràpida*, l'*Adaptabilitat*, la *Reconfigurabilitat*, la *Robustesa*, la *Transformació del Coneixement*, la *Cooperativitat* i la *Universalitat* dels subsistemes que les componen. Responent a aquest repte tecnològic, s'aconsegueix respondre a les necessitats industrials provinents dels reptes imposats pels mercats, que busquen productes cada cop més innovadors i personalitzats i imposen als fabricants sèries de producte cada cop més curtes i que necessiten cada cop més immediatesa de reacció als canvis de tendència del mercat.

La present Tesi Doctoral realitza una contribució a la Construcció de Models del Món per a la implementació en Arquitectures Àgils de Fabricació, amb la intenció de portar un pas més enllà els programes de control dels sistemes de fabricació, tot fent que passin de ser simples executors de tasques a ser elements amb "intel·ligència" que els permeti decidir per ells mateixos quina és la millor estratègia per abordar una tasca encomanada. Dit d'altra manera, la informació d'entrada al sistema de fabricació ha de deixar de ser una seqüència determinista de comandes per convertir-se en una especificació d'Estats *inicial* i *final*.

El treball parteix dels treballs previs de Gomà i Vivancos per construir models lògics de sistemes senzills i n'enuncia uns corol·laris relatius al seu funcionament. A continuació, desenvolupa nous algorismes basats en les etapes principals d'*Exploració del Món* i d'*Execució de Tasques*; primer per mòns només poblats per variables binàries i més tard amb la introducció del tractament de contínues. Aquests algorismes, innovadors ja que introdueixen la possibilitat d'aplicar prejudicis lògics sobre el món, permeten aplicar diferents estratègies de construcció de Models del Món.

Per a avaluar la bona aplicabilitat d'aquests algorismes, es realitza la programació d'una plataforma d'experimentació en llenguatge C+ i es particularitza una especificació de

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

sistemes segons les seves variables per tal d'interpretar com hauria de ser la implementació d'aquests en diferents tipologies de Màquina (Fabricació per arrencament de ferritja i Fabricació Additiva), així com en sistemes complexos com les Arquitectures Àgils de Fabricació que han estat objecte d'estudi i de materialització en treballs a l'entorn de la present Tesi Doctoral.

Durant els darrers anys, el paradigma de la fabricació ha canviat. Xina i l'Àsia s'han convertit en la fàbrica de tot el món i els països desenvolupats han hagut de començar campanyes de reindustrialització molt agressives per relocalitzar la indústria perduda. En alguns casos, sectors especialment rellevants –com el cas biomèdic, el cas de la joguina i els productes de consum- s'han presentat com a oportunitats daurades per assolir resultats esperançadors i han estat objecte d'un anàlisi en profunditat en el present treball.

Paral·lelament, durant aquests anys, la recerca i el desenvolupament de sistemes de fabricació no han estat aturats; de fet ha aflorat amb força una nova comunitat anomenada “*Makers*”, formada per usuaris molt ben capacitats moguts per interessos no lucratis que estan fent canviar les regles del joc. Aviat, amb la fabricació digital personal i la generació i compartició de continguts de manera virtual, canviaran la manera de produir productes (i per tant de concebre'ls, transportar-los, utilitzar-los i de comerciar amb ells), tot fent possible el moviment que ja es considera com la “Democratització de la producció”.

Els algoritmes presentats pretenen mantenir un nivell d'abstracció elevat. “*Acció*” i “*detecció*” es tracten com a processos desacoblats internament, de manera que el sistema hagi de fer necessàriament un procés d'aprenentatge lògic. Més enllà de l'abast de la contribució de la present Tesi Doctoral, la intenció d'aquest treball és haver pogut aportar unes especificacions funcionals que podran ser posades a l'abast de la comunitat i que podran servir de llavor per permetre el desenvolupament de nous paradigmes de fabricació intel·ligent (*iCAM*) en veritables Arquitectures Àgils de Fabricació.

Abstract

Since the first introduction of Computer Numerical Control systems (CNC) in machine-tools and manufacturing systems (dated from 1940), the Computer-Aided Manufacturing technologies have reached a stage of development which makes that no longer can be conceived an advanced production process if it is not managed by a computer integration.

Over the time, new systems and machines have incorporated improvements that have enabled the manufacturers to achieve revolutionary results on productivity, efficiency and quality, bringing products that were almost only conceived in science-fiction. However, most systems work with completely deterministic manufacturing control architectures in which the CNC is only used to carry out heavy numerical work in an automatic mode and only very rarely are used to perform “*truly intelligent*” computations.

The new paradigms on the Factories of the Future point towards the use of new configurations of work cells called “Agile Manufacturing Architectures”, which need to empower the systems with intelligent capabilities such as: *Quick response, Adaptability, Reconfigurability, Robustness, Knowledge Transformation, Cooperative behaviour* and *Universality* of the composing subsystems. By meeting this technological challenge, it is possible to respond to the industrial needs challenged by the markets that increasingly search for products more innovative personalized increasingly imposing to the manufacturer’s shorter product series and ever more immediate reaction times to changes in the market trends.

The present work composes a contribution towards the Construction of World models for its implementation in “Agile Manufacturing Architectures”, aiming to take a step further the control programs for manufacturing systems, making it go from being mere tasks implementers to be entities with “*intelligence*” that allow them to decide for themselves what is the best strategy to approach a certain given task. In other words, the input information to the production system should stop being a deterministic sequence of commands to become a specification of *initial* and *final* states.

The work builds on previous results of Gomà and Vivancos to build logical models of simple systems and enunciates some corollaries relating to its operation. Then, it develops new algorithms based on the main stages of *World Exploration* and *Tasks Implementation*; initially only for Worlds populated by binary variables and later with the introduction of the treatment of continuous variables. These algorithms, innovative as they introduce the possibility of applying logical prejudices about the world, can apply different strategies to build world models.

To evaluate the applicability of these algorithms it is programmed in C+ an experimentation platform for particularised systems and a specification according to the variables that should be utilised in the implementation of these algorithms in different types of manufacturing equipment (Machine tools for Subtractive methods and Additive Manufacturing systems) as well as in complex systems such as the “Agile Manufacturing Architectures”, that have been studied and materialized in works in the context of the present Thesis.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

In recent years, the paradigm of manufacturing has changed. China and Asia have become the factory of the world and all developed countries have had to begin aggressive re-industrialization campaigns to relocate the industry lost. In some cases, particularly relevant sectors –like the biomedical sector, the Toys case and the Consumer products-, have been presented as a golden opportunity to achieve promising results and have been the subject of an in-depth analysis in this work.

Meanwhile, during these years, research and development of manufacturing systems have not been stopped; in fact, it has emerged a new community called “*Makers*”, built upon very well trained users, motivated by non-profit aspirations that are making to change the game rules. Soon, the personal digital fabrication and the virtual generation and sharing of content will end up to change the way of producing products (and therefore to conceive, to transport, to use and to trade with them), making possible a movement that is being considered as the “Democratization of the production”.

The algorithms presented are intended to maintain a high level of abstraction. “*Action*” and “*detection*” are internally treated as entirely independent processes, so the system must necessarily learn by an internal logical process. Moreover, beyond the scope of the contribution of this Thesis, the aim of this work is being able to provide a functional specification that can be made available to the community and may serve as a seed to allow the development of intelligent manufacturing paradigms (*iCAM*) in truly *Agile Manufacturing Architectures*.

Resumen

Desde la primera introducción de sistemas de Control Numérico por Computador (CNC) en máquinas-herramienta y sistemas de fabricación (documentada en el año 1940), las tecnologías de fabricación asistidas por ordenador han alcanzado un estado de maduración hasta el punto que ya no se puede concebir procesos de producción avanzados que no estén gobernados por una integración informática.

Con el tiempo, los nuevos sistemas y máquinas han incorporado mejoras revolucionarias que han permitido alcanzar cotas de productividad, eficiencia y calidad que permiten obtener productos casi de ciencia-ficción. Sin embargo, la mayoría de sistemas de fabricación trabajan con arquitecturas de control completamente deterministas en los que el CNC sólo se utiliza para realizar tareas numéricas pesadas en modo automático y sólo en contadas ocasiones se utiliza para realizar computaciones “*verdaderamente inteligentes*”.

Los nuevos paradigmas de la Fábrica del Futuro apuntan hacia el uso de nuevas configuraciones de trabajo denominadas “*Arquitecturas Ágiles de Fabricación*”, en las que es necesario dotar a los sistemas con inteligencia para poder desplegar capacidades como la *Respuesta Rápida*, la *Adaptabilidad*, la *Reconfigurabilidad*, la *Robustez*, la *Transformación del Conocimiento*, la *Cooperatividad* y la *Universalidad* de los subsistemas que las componen. Respondiendo a este reto tecnológico, se consigue responder a las necesidades industriales provenientes de los retos impuestos por los mercados, que buscan productos cada vez más innovadores y personalizados e imponen a los fabricantes unas series de producto cada vez más cortas y que necesitan cada vez más inmediatez de reacción los cambios de tendencia del mercado.

La presente Tesis Doctoral realiza una contribución a la Construcción de Modelos del Mundo para la implementación en Arquitecturas Ágiles de Fabricación, con la intención de llevar un paso más allá los programas de control de los sistemas de fabricación, haciendo que pasen de ser simples ejecutores de tareas a ser elementos con “*inteligencia*” que les permita decidir por sí mismos cuál es la mejor estrategia para abordar una tarea encomendada. Dicho de otro modo, la información de entrada al sistema de fabricación debe dejar de ser una secuencia determinista de comandos para convertirse en una especificación de Estados *inicial* y *final*.

El trabajo parte de los resultados previos de Gomà y Vivancos para construir modelos lógicos de sistemas sencillos y enuncia unos corolarios relativos a su funcionamiento. A continuación, desarrolla nuevos algoritmos basados en las etapas principales de *Exploración del Mundo* y de *Ejecución de Tareas*; primero para mundos sólo poblados por variables binarias y más tarde con la introducción del tratamiento de variables continuas. Estos algoritmos, innovadores ya que introducen la posibilidad de aplicar prejuicios lógicos sobre el mundo, permiten utilizar diferentes estrategias de construcción de *Modelos del Mundo*.

Para evaluar la buena aplicabilidad de estos algoritmos, se realiza la programación de una plataforma de experimentación en lenguaje C+ y se particulariza una especificación de sistemas según sus variables para interpretar cómo debería ser la implementación de

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

estos en diferentes tipologías de máquina -herramienta (Fabricación por arranque de viruta y Fabricación Aditiva), así como en sistemas complejos como las Arquitecturas Ágiles de Fabricación que han sido objeto de estudio y de materialización en trabajos en el entorno de la presente Tesis Doctoral.

Durante los últimos años, el paradigma de la fabricación ha cambiado. China y Asia se han convertido en la fábrica de todo el mundo y los países desarrollados han tenido que empezar campañas de reindustrialización muy agresivas para relocalizar la industria perdida. En algunos casos, sectores especialmente relevantes -como el caso biomédico, el caso del juguete y los productos de consumo- se han presentado como oportunidades doradas para alcanzar resultados esperanzadores y han sido objeto de un análisis en profundidad en el presente trabajo.

Paralelamente, durante estos años, la investigación y el desarrollo de sistemas de fabricación no han estado detenidos; de hecho ha aflorado con fuerza una nueva comunidad llamada "*Makers*", formada por usuarios muy bien capacitados movidos por intereses no lucrativos que están haciendo cambiar las reglas del juego. Pronto, con la fabricación digital personal y la generación y compartición de contenidos de manera virtual, cambiará la manera de producir productos (y por tanto de concebirlos, transportarlos, utilizarlos y de comerciar con ellos), haciendo posible un movimiento que ya se considera como el de "*Democratización de la producción*".

Los algoritmos presentados pretenden mantener un nivel de abstracción elevado. "*Acción*" y "*detección*" se tratan como procesos internamente desacoplados, de modo que el sistema tenga que hacer necesariamente un proceso de aprendizaje lógico. Más allá del alcance de la contribución de la presente Tesis Doctoral, la intención de este trabajo ha sido haber podido aportar unas especificaciones funcionales que podrán ser puestas a disposición de la comunidad y que podrán servir de semilla para permitir el desarrollo de nuevos paradigmas de fabricación inteligente (*iCAM*) en verdaderas Arquitecturas Ágiles de Fabricación.

Nomenclatura

Capítol 3. Exploració de Sistemes Binaris segons l'algoritme de Gomà i Vivancos

E_i	Senyal d'entrada percebuda pel sensor 'i' del sistema. Pot prendre com a valors '0' o '1'.
A_i	Senyal de sortida enviada pel sistema per posar en funcionament l'actuador 'i'. Pot prendre com a valors '0' o '1'.
$\{E\}=\{E_1, E_2, \dots E_n\}$	Vector de Funcions de percepció del sistema
$EO_{i(t)}$	Estat de l'Objecte 'i' a l'instant 't'
$\varepsilon O_{(t)}$	Estat de tots els Objectes diferents de l'objecte 'i', a l'instant 't'
$\{EO_{(t=t+1)}\}=\{f(X_t)\}$	Funcions de canvi d'estat del sistema, on 'X' pot ser 'Ai(t)', 'EOi(t)' o 'εO(t)'
$\{S\}$	Conjunt de senyals rebudes d'un Sensor
N	Nombre de valors diferents que pot prendre una senyal

Capítol 4. Exploració d'algoritmes en Sistemes Binaris

E_i	Senyal d'entrada percebuda pel sensor 'i' del sistema. Pot prendre com a valors '0' o '1'.
A_i	Senyal de sortida enviada pel sistema per posar en funcionament l'actuador 'i'. Pot prendre com a valors '0' o '1'.
N	Dimensió segons l'eix 'x' de la retícula de treball en un hipotètic taulell 2D.
M	Dimensió segons l'eix 'y' de la retícula de treball en un hipotètic taulell 2D.
$\{S\}=\{S_1, S_2, \dots S_n\}$	Vector que conté totes les senyals dels sensors. En el cas general d'una retícula 2D, $dim\{S\}=dim('N \times M')$
$\{E_0\}=\{E_{10}, E_{20}, \dots E_{n0}\}$	Vector que conté els valors de $\{S\}$ a la situació inicial. Es tracta d'un vector de nombres binaris. En el cas general, $dim\{E_0\}=dim('N \times M')$
$\{E_f\}=\{E_{1f}, E_{2f}, \dots E_{nf}\}$	Vector que conté els valors de $\{S\}$ a la situació final desitjada. Es tracta d'un vector de nombres binaris. En el cas general, $dim\{E_f\}=dim('N \times M')$

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

$\{\xi\}=\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_j\}$	Vector que conté tots els estats possibles coneguts (o assolits) del sistema. A l'inici d'una exploració, $\dim\{\xi\}=2$ (estats inicial i final desitjat)
$\{A\}=\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$	Vector que conté totes les senyals dels accionaments. En el cas inicial, $\dim\{A\}=2$ (es tenen dos accionaments, segons els eixos cartesianes 'x' i 'y')
$\{\alpha\}=\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\}$	Vector que conté totes les combinacions de consignes que es poden enviar als accionaments. En el cas general $\dim\{\alpha\}=k$. En el cas inicial estudiat en el Capítol 4 $\dim\{\alpha\}=3$ (inicialment es consideren només tres combinacions: $\{\alpha_1\}=\{0,0\}$, $\{\alpha_2\}=\{0,1\}$ i $\{\alpha_3\}=\{1,0\}$)
$f(\{E_{i-1}\}, \{\alpha_j\})$	Funció de canvi d'estat. Relaciona un estat anterior i següent segons $\{E_i\} = f(\{E_{i-1}\}, \{\alpha_j\})$
$\{F\}=\{f_1, f_2, \dots, f_k\}$	Conjunt de funcions de canvi d'estat.
$\sigma_{2,i}$	Solució i-èsima per a realitzar una tasca encomanada com a assoliment d'un estat final $\{E_{f2}\}$ a partir d'un estat inicial $\{E_{02}\}$. Conté la seqüència d'accions $\{\alpha_{\sigma_{2,i}}\}$ que cal realitzar i per tant implica una seqüència d'estats $\{\xi_{\sigma_{2,i}}\}$ que s'aniran assolint per arribar-hi.
$C_{\sigma_{2,i}}$	Cost de la Solució ' $\sigma_{2,i}$ '.
C_{02-f2}^*	Cost òptim de la tasca encomanada com a assoliment d'un estat final $\{E_{f2}\}$ a partir d'un estat inicial $\{E_{02}\}$.
Ω_i	Model del món i-èsim. De manera general es compona dels elements $\{\alpha\}$, $\{S\}$, $\{\xi\}$ i $\{F\}$ corresponents al cas 'i'.
$\{\xi'\}$	Llista d'estats possibles per hipòtesi.
$\{F'\}$	Funcions de canvi d'estat per hipòtesi.
$[\psi]$	Tupla que conté la informació sobre els canvis d'estat en aplicar cadascuna de les consignes $\{\alpha\}$ als diferents estats assolits $\{\xi\}$.
$\{\lambda_i\}$	Variables auxiliars per emmagatzemar la informació dels estats assolits durant la construcció d'un camí que arribi a l'Estat Final desitjat $\{E_{fj}\}$ a partir d'un Estat Origen $\{E_{0j}\}$. En concret, per a un camí de solució $\sigma_{2,i}$, es té que $\{\xi_{\sigma_{2,i}}\}=\{\xi_{\sigma_{2,i1}}, \xi_{\sigma_{2,i2}}, \dots, \xi_{\sigma_{2,iin}}\}=\{\lambda_n, \lambda_{n-1}, \dots, \lambda_1\}$.
$\{\delta_{ij}\}$	Variables auxiliars per emmagatzemar la informació de les consignes a aplicar en cadascun dels estats assolits durant la construcció d'un camí que arribi a l'Estat Final desitjat $\{E_{fj}\}$ a partir d'un Estat Origen $\{E_{0j}\}$. En concret, per a un camí de solució $\sigma_{2,i}$, es té que $\{\alpha_{\sigma_{2,i}}\}=\{\alpha_{\sigma_{2,i1}}, \alpha_{\sigma_{2,i2}}, \dots, \alpha_{\sigma_{2,iin}}\}=\{\delta_n, \delta_{n-1}, \dots, \delta_1\}$.
ρ_{ah}	Ponderació de pes que fixa el cost relatiu de cada α_h utilitzada corresponent en cada cas ($\dim\{\alpha\}=k$). Tot i que es pot parametritzar per part de l'usuari, per defecte es pren igual a 1 en tots els casos 'h'.

Capítol 5. Exploració d'algoritmes en Sistemes amb variables Binaries i Contínues

$\{\theta_i\}$	Obstacle en una posició 'i' d'una possible retícula 2D.
$[\xi_{\sim}]$	Estats Ocults, no visible per al sistema.
$[\xi]$	Estats no assolible per al sistema, que ho havia estat abans de succeir algun fet irreversible
$[\alpha_{\sim}]$	Accionaments no controlats directament pel sistema, però amb efectes sobre l'evolució del món
$\{\rho_{\theta_i}\}$	Ponderació de Cost de desplaçar o eliminar un obstacle en un determinat Món ocupant una posició 'i' d'una possible retícula 2D.
$\{\theta_i\}$	Obstacle eliminat, anteriorment ocupant una posició 'i' d'una possible retícula 2D.
$\{\rho_{\theta_i}\}$	Ponderació de Cost de desplaçar o eliminar un obstacle en un determinat Món que ocupava una posició 'i' d'una possible retícula 2D i que ha estat eliminat.

Capítol 1. Introducció

1.1. Plantejament general

L'aplicació de sistemes de Control Numèric per Computador a arquitectures de Màquina-eina és una tecnologia que ha evolucionat molt des dels seus inicis a la dècada de 1940, quan la *Bendix Corporation* va fer una primera aplicació de CN en la mecanització d'una lleva tridimensional per al regulador d'una bomba d'injecció per a motor d'aviació^[1]. Actualment, les tecnologies de fabricació assistides per ordinador tenen una àmplia aplicació dins el camp dels processos de fabricació i ja no s'entén un procés de producció avançat si no està governat per una integració informàtica.

Els ordinadors són sistemes que tenen unes propietats especials que els fan idonis per a la realització de moltes tasques diferents. Treballen molt bé en entorns definits, poden realitzar tasques repetitives amb precisió, són capaços de realitzar càlculs complicats i poden emmagatzemar una gran quantitat de dades. A més, a diferència de les persones, no es cansen i la qualitat del seu treball no depèn de l'estat d'ànim o del seu entorn. Totes aquestes propietats són perfectes per a fer-los governar màquines i implantar processos monòtons i definits, especialment en les línies de fabricació flexible.

Malauradament, el gran avantatge que suposa tenir un ens productiu que només reproduïx allò que li ha estat programat es converteix en un gran desavantatge quan s'introdueix incertesa en el sistema. Dit d'altra manera, un sistema regit per un Control Numèric comú no és capaç de reaccionar en front a canvis en l'entorn i menys encara d'aprendre sobre allò que l'envolta i sobre les lleis que regeixen a sí mateix.

El problema de dotar d'intel·ligència a les màquines de manera que siguin capaces de treballar de forma autònoma amb un mínim d'especificacions, ha estat abordat en gran mesura durant la segona meitat del segle XX^[2]. La Intel·ligència Artificial, tot i que no té una definició única, és definida per alguns autors com Winston^[2] com "*l'estudi de les computacions que permeten percebre, raonar i actuar*". La Intel·ligència Artificial (IA) comprèn un seguit de tècniques i mètodes que tenen aplicació directa i que poden ser combinades en la resolució de problemes de muntatge com ara els Agents Intel·ligents, els Sistemes Experts, la Lògica Difusa, les Xarxes Neuronals Artificials, o les Xarxes de Petri.

Les Tecnologies Avançades de Fabricació, per la seva banda, proporcionen un paradigma complex i ple de reptes importants. Cada dia més, el mercat demana incorporar més varietat de productes amb materials més diversos i que impliquen més operacions en el procés de Fabricació per a aconseguir productes gairebé únics. D'altra banda, l'entorn cada cop més competitiu, la globalització i l'alt cost dels recursos, obliguen a minimitzar els costos productius i a maximitzar l'eficiència productiva.

Es per això que en aquest trencaclosques tan complex s'hi uneixen alhora una necessitat tecnològica i una necessitat industrial. La necessitat tecnològica consisteix en ser capaços de construir màquines dotades d'Intel·ligència, que tinguin capacitat per a aprendre i actuar autònomament, mentre que la necessitat industrial prové de ser capaços d'implantar

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

màquines i més en general estructures productives que tinguin capacitat per a treballar amb menys especificacions i de manera més robusta.

En efecte, la saturació de la oferta en una demanda cada cop més exigent fa que els mitjans productius hagin de ser capaços de fabricar productes personalitzats en sèries curtes i alhora que aquests sistemes productius siguin senzills d'utilitzar. A més, les *megatendències* dels darrers temps com ara la utilització massiva d'Internet com a mitjà d'intercanvi d'informació i coneixements combinades amb fets com la irrupció de l'electrònica fàcilment programable empenyen cada cop més cap a una democratització dels sistemes productius que apunta cap a la producció local i distribuïda mitjançant sistemes de fabricació de baix cost i utilitzats per usuaris no experts –en molts casos, pels propis demandants de producte que es converteixen així en productors locals.

Una manera de donar resposta a tots aquests desafiaments és mitjançant el desenvolupament i us d'Arquitectures Àgils de Fabricació (en anglès, particularitzant a Arquitectures de Muntatge: “AAA's” o “*Agile Architectures for the Assembly*”). El nom “Fabricació Àgil” és un terme relativament recent en les tecnologies de la producció que correspon a estructures productives que combinen propietats com *Resposta ràpida, Adaptabilitat, Reconfigurabilitat, Robustesa, Transformació del coneixement, Cooperativitat i Universalitat*. Els sistemes Àgils són capaços de treballar amb condicions no definides completament i poden reaccionar davant canvis inesperats.

Una revisió de la literatura mostra que la implementació d'estructures productives intel·ligents ha estat abordada en gran mesura en els darrers anys. S'utilitzen tècniques d'IA per al disseny, simulació, determinació de processos, planificació, control de l'execució i verificació de resultats de muntatges de productes. Gràcies a la combinació de tècniques d'IA i de coneixements i desenvolupaments pel que fa a processos de fabricació, els resultats obtinguts són força positius i esperançadors de cara al futur.

1.2. Model lògic de comportament de sistemes intel·ligents

Una primera aproximació als models de comportament de sistemes que incorporin Intel·ligència Artificial duta a terme pel grup de Fabricació Integrada per Ordinador del Departament d'Enginyeria Mecànica de la Universitat Politècnica de Catalunya és la construcció d'un model lògic i plenament determinista de les lleis que governen l'Univers format pel sistema en sí i el seu entorn^[3].

La metodologia de construcció d'aquest model lògic (Veure Figura 1.2-1) està basada en el disseny i execució d'estratègies i posterior observació de resultats en un bucle que dona com a resultat un “*Model del Món*” inicial.

Aquest *Model del Món* conté bàsicament quatre llistes que són:

- Llista d'Objectes continguts en el món.
- Llista d'Estats possibles per a cadascun dels objectes.
- Llista de Funcions de Canvi d'Estat (quin efecte té en els estats del sistema una determinada acció).
- Llista de Funcions de Percepció (quins efectes tenen en els sensors els diferents estats dels objectes).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

En aquesta aproximació, per tal de completar la informació continguda en aquestes llistes, és necessari que el sistema realitzi totes les combinacions possibles entre les funcions de canvi d'estat i que n'avalui el resultat per a tots els objectes continguts en l'Univers. El model del món resultant és doncs un model complet en el sentit que preveu unívocament tots els successos possibles i les seves conseqüències previstes.

Un cop el sistema ha construït un model del món, segons la metodologia presentada pels autors, només cal donar noms als objectes i funcions amb que treballa i ja queda llest per a rebre ordres de treball. Aquestes ordres estan definides en un nivell d'abstracció elevat, no essent necessari especificar el seguit d'accions a realitzar sinó l'objectiu final (l'estat de determinats objectes) al qual es pretén arribar.

El disseny de l'estratègia és llavors feina del propi sistema. Si el que s'ha aconseguit durant la construcció del model del món és una representació per grafs dels diferents estats i transicions d'estat, el disseny de l'estratègia es correspon a la determinació del camí mínim a recórrer pel graf entre els nodes inicial i final.

L'etapa d'execució de les estratègies dissenyades pel sistema és equivalent a la fase d'execució dels experiments dissenyats per a analitzar el món en el bucle inicial. De la mateixa manera, si en observar els resultats de l'experimentació el sistema comprova que no es corresponen amb els previstos (estat desitjat), el sistema manté oberta la possibilitat de canviar el model del món, aprenent en base a l'experiència. Tant si el sistema ha canviat la seva modelització del món o no, pot continuar realitzant experiments per arribar a l'estat desitjat.

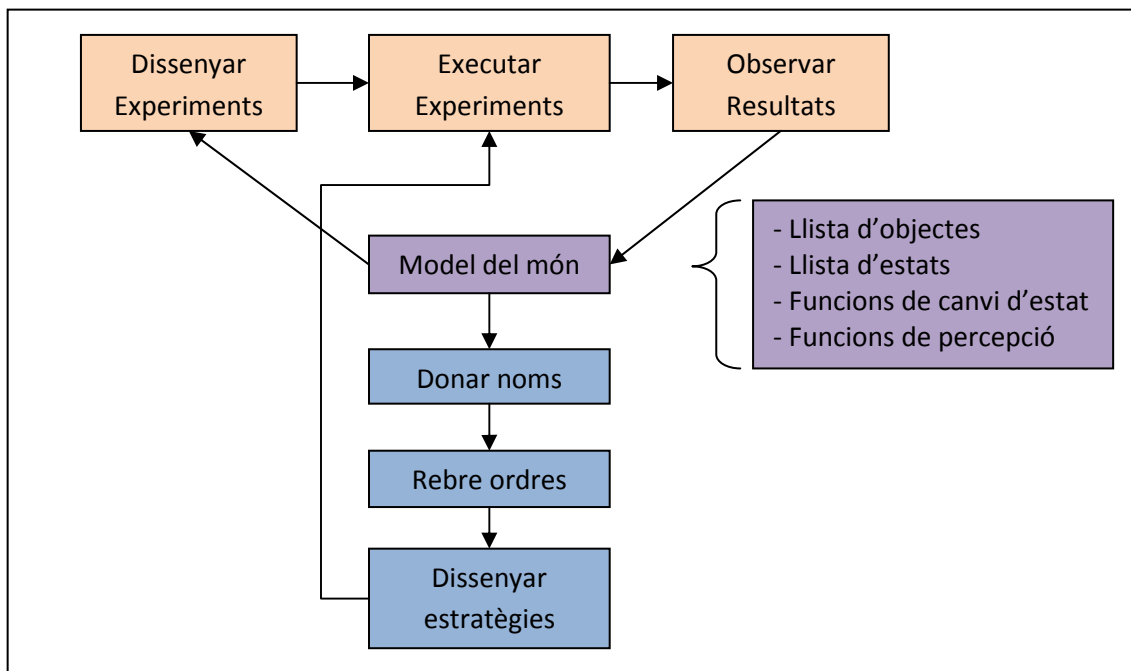


Figura 1.2-1. Esquema de blocs de les etapes de construcció d'un model del món i de l'execució d'ordres rebudes per part de sistemes intel·ligents. Font: Elaboració pròpia

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Que el model sigui complet suposa un gran avantatge de cara a la seva utilització per part dels sistemes, però és també un greu inconvenient doncs fa que el sistema necessiti realitzar forçosament tots els experiments possibles de cara a poder començar a treballar.

Per aquest motiu, els mateixos autors conclouen en el seu treball que en aproximacions futures als algoritmes per obtenir models del món cal fer possible que el model treballi amb prejudicis lògics de l'estil de “no existeixen miracles respecte a la observació”^[i], la “inferència a la millor explicació”^[ii] i en general, l'abstracció^[iii].

A més, és important tenir en compte que, un model del món és en sí un element dinàmic, de forma que el sistema sempre està obert a canviar-lo quan observa que els resultats dels experiments es contradiuen amb les lleis que el regeixen.

1.3. Objectius de la Tesi

D'acord amb el que s'ha presentat en els apartats introductoris anteriors, es proposen els objectius generals i específics que es detallen a continuació.

1.3.1. Objectius generals

L'objectiu general de la Tesi Doctoral “Contribució als algoritmes de construcció de teories del món per a la implementació en Arquitectures Àgils de Fabricació” és contribuir a la implementació de solucions altament flexibles de fabricació mitjançant el disseny d'algoritmes genèrics i aplicables a qualsevol sistema de fabricació (en concret, a sistemes Àgils de Fabricació) que siguin capaços d'analitzar i desxifrar el seu entorn per a posteriorment interactuar amb ell i dur a terme les tasques que li siguin encomanades.

Aquests algoritmes s'han de poder aplicar per a analitzar l'entorn en base a l'observació i a la realització d'experiments. Un cop l'algoritme hagi modelat el món que l'envolta (és a dir, quan el *model del món* estigui llest), el sistema ha de ser capaç de rebre ordres en forma d'objectiu, dissenyar la millor estratègia per a assolir els resultats demanats i executar-la utilitzant les seves capacitats.

Els resultats d'aquesta Tesi han de proporcionar un nou enfocament a les aplicacions de treball en arquitectures de fabricació altament flexibles. A base d'introduir complexitat en el model i de fer-lo funcionar en sistemes amb més graus de llibertat (accionaments), s'ha de fer possible augmentar el nombre d'operacions, millorar l'eficiència de treball, disminuir la dificultat operacional i simplificar la interacció entre usuari i màquina.

[i] **Regla de no miracles** $B \rightarrow A$ és cert.

[ii] **Inferència a la millor explicació**: S'escull el model més simple capaç d'explicar més casos.

[iii] **Abstracció**: Tots els P són Q. A més, Ser Q és un cas particular de ser R \rightarrow Tots els P són R.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

1.3.2. Objectius específics

Per tal d'assolir l'objectiu general plantejat, es proposen una sèrie d'objectius concrets que són els següents:

- Explorar els algoritmes de control d'agents i en concret, aprofundir en els algoritmes universals de control.
- Desenvolupar programes en els quals es pugui implementar els algoritmes resultants del present treball i fer-hi aplicacions experimentals.
- Estudiar i analitzar diferents topologies i arquitectures de màquines i de Cèl·lules de Fabricació Flexible
- Estudiar i analitzar amb detall el context dels sistemes de Fabricació Àgil a través de casos paradigmàtics d'interacció entre producte i procés.

1.4. Metodologia

La metodologia emprada per a la realització del present treball ha estat la utilització de models lògics per formalitzar algoritmes i la seva validació posterior mitjançant aplicacions informàtiques desenvolupades a mida i l'estudi i anàlisi de diferents topologies de sistemes de fabricació i de la interacció entre producte i procés.

L'abordatge dels modes d'aprenentatge i comportament d'estructures altament flexibles de fabricació (Arquitectures Àgils de Fabricació) a través de models lògics és un enfocament disruptiu i innovador per al funcionament i control d'aquest tipus de sistemes. En efecte, en l'anàlisi exhaustiu de l'estat de l'art no es troba aquest tipus d'enfocament amb tanta profunditat, que en canvi sol utilitzar com a aproximacions estàndard les Xarxes Neuronals, la Lògica Difusa, els Sistemes Experts i altres tècniques lligades al Reconeixement de Patrons.

D'aquesta manera, la present Tesi Doctoral dissenya diversos algoritmes genèrics aplicables a qualsevol sistema productiu, per tal que els sistemes explorin el seu Món (entès com l'entorn del sistema i el seu propi funcionament) i aconseguixin desxifrar i aprendre les lleis que el regeixen. Un cop els sistemes han aconseguit formalitzar un Model lògic de Comportament del Món, la present Tesi Doctoral també aporta un algoritme que inclou l'aplicació de prejudicis lògics, per tal d'aconseguir que el sistema actuï autònomament per dur a terme les tasques de producció que li siguin encomanades.

Els algoritmes d'Exploració del Món i d'Execució de Tasques s'aborden primer per al cas de variables binàries i després per a variables binàries i contínues. A mesura que es va introduint més complexitat en el model, es permet flexibilitzar les arquitectures i estendre el nombre d'agents involucrats

El contrast de les hipòtesis realitzades respecte a la utilització de models lògics per a la implementació en Arquitectures Àgils de Fabricació es realitza des de dues vessants. D'una banda, la validació dels algoritmes desenvolupats es du a terme mitjançant la utilització d'una aplicació informàtica desenvolupada a mida anomenada "Espai d'Estats". D'altra banda, la validació de la viabilitat d'aplicació real dels algoritmes desenvolupats en sistemes de

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

fabricació àgils es du a terme mitjançant l'anàlisi del tractament que cal donar als algoritmes a diferents topologies de màquines-eina, sistemes de Fabricació Additiva i Cèl·lules de Fabricació Flexible.

Pel que fa a l'anàlisi de la interacció entre producte i procés, donada la seva repercussió sobre els sistemes Àgils de fabricació, l'estudi es realitza en base a la revisió dels projectes desenvolupats durant més de set anys a la Fundació Privada Centre CIM i de les iniciatives realitzades en el marc de les comunitats de creadors de programari i maquinari lliure i obert. Aquesta contribució tampoc havia estat registrada anteriorment i constitueix en sí mateixa una aportació singular als sistemes de fabricació que estaran disponibles en el futur.

1.5. Estructura de la Tesi

L'estructura de la present Tesi Doctoral està repartida en dos Capítols introductoris (Capítols 1 i 2, que componen el marc i estat de l'art dels sistemes de fabricació intel·ligents i les Arquitectures Àgils de Fabricació), seguits de quatre capítols de formalització, estudi i implementació d'algoritmes de construcció de models del món en Arquitectures Àgils de Fabricació (Capítols 3, 4, 5 i 6; nucli de la Tesi) i finalment un darrer Capítol de Conclusions, repercussions i Treballs Futurs previstos com a continuació de la present Tesi Doctoral (Capítol 7).

Els 4 Capítols que componen el nucli de la Tesi combinen el detall de la confecció dels algoritmes amb la seva aplicació pràctica i materialització mitjançant programació d'eines informàtiques. Així, en el Capítol 3 es pot veure una primera aproximació per a sistemes automàtics, en el Capítol 4 una nova metodologia i nous algoritmes per a sistemes binaris implementats segons *Microsoft® Visual Studio®* i en el Capítol 5 l'extensió de la metodologia i nous algoritmes per a sistemes amb variables binàries i contínues. Finalment, al Capítol 6 es recull l'extensió a diverses topologies de Màquines (màquines-eina per a l'arrencament d'encenalls o sistemes de producció per Fabricació Additiva) i Cèl·lules de Fabricació Flexible.

Tanmateix, el treball es completa amb 5 Annexos que recullen informació suplementària sobre l'exploració de mons amb diferents algoritmes i sobre l'utilització del programari realitzat per al present treball i informació rellevant sobre productes i processos de fabricació innovadors en context amb els paradigmes actuals. De fet, els treballs en el món de la fabricació no es poden explicar correctament sense atendre a l'evolució dels productes i la societat. Per això, els Annexos 4 i 5 (Fabricació poc convencional i Sistemes de fabricació Intel·ligent lliures i oberts) són peces indispensables per comprendre els objectius i les fites que s'assoliran en els futurs sistemes de fabricació.

1.6. Publicacions realitzades en el Marc de la Tesi

1.6.1. Publicacions realitzades sobre Sistemes de Fabricació Intel·ligent

1. **Minguella J., Buj I., Gomà J.R.:** *Implementation of Intelligent Manufacturing algorithms in Agile Architectures for Production: World models for systems*

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

- incorporating binary and continuous variables*. 18th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology". TMT 2014, Budapest, Hongria 10-12 Setembre, 2014 [Article acceptat. Prevista comunicació oral i publicació a proceedings]
2. **Minguella J., Buj I., Gomà J.R.:** *Construction of world models for the implementation of intelligent manufacturing algorithms in agile architectures for production: The Binary Systems case*. 17th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology". TMT 2013, Istanbul, Turquia, 10-11 Setembre 2013 [Comunicació oral i publicació a proceedings]
 3. **Arjona J., Minguella J., Vivancos J.:** *SelecTool: Advantages and Opportunities in the utilisation of a smart software tool for the search, comparison and selection of cutting tools*. The 5th Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013. Saragossa, 26-28 Juny de 2013 [Comunicació oral i publicació per *Elsevier- Procedia Engineering*]
 4. **Arjona J., Minguella J., Vivancos J.:** *SelecTool: Software tool for the search and comparison of cutting tools depending on standard, geometric and cutting properties and user's criteria*. 37th MATADOR International Conference. Manchester, R.U., 25-27 de Juliol 2012 [Comunicació oral i publicació accessible en-línia per *Springer-Verlag*]
 5. **Gomà, J.R., Minguella, J.:** *Trends in Autonomous Flexible Systems for Assembly processes based on Artificial Learning and Understanding of the Environment*. 12th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" (TMT 2008). Istanbul, Turquia, 26-30 d'Agost de 2008. [Comunicació oral i publicació a proceedings]. CIP- Katalogizacija u publikaciji Nacionalna i univerzitetska biblioteka, 2008, p. 49-52
 6. **Gomà, J.R., Minguella, J.:** *Survey on the Characteristics of Assembly Parts utilised by Flexible Systems in the Manufacturing Processes of Low weight and Volume Goods*. 12th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" (TMT 2008). Istanbul, Turquia, 26-30 d'Agost de 2008. [Comunicació oral i publicació a proceedings]. CIP- Katalogizacija u publikaciji Nacionalna i univerzitetska biblioteka, 2008, p. 405-408.
 7. **Minguella, J., Gomà, J.R.:** *Informe test de validacions*. Report de recerca projecte "Estació de Muntatge Universal", 31 de Desembre de 2007.
 8. **Minguella, J., Gomà, J.R.:** *Famílies de Components*. Report de recerca projecte "Estació de Muntatge Universal", 31 de Novembre de 2006.
 9. **Minguella, J., Gomà, J.R.:** *Recull de Característiques de Diferents Subsistemes*. Report de recerca projecte "Estació de Muntatge Universal", 30 de Juny de 2006.
 10. **Minguella, J., Gomà, J.R.:** *Estat de l'Art de les Estacions de Treball de Configuració Ràpida*. Report de recerca projecte "Estació de Muntatge Universal", 31 de Maig de 2006.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

11. **Minguella, J.; Gomà, J.R.:** *Tipus de Presentació de peces en sistemes productius per a la seva integració en Arquitectures Àgils de Fabricació*. Report de recerca projecte "Estació de Muntatge Universal", 30 d'Abril de 2006.

1.6.2. Publicacions realitzades sobre casos específics de desenvolupament de producte

1. **Vitale-Brovarone, C., Baino, F., Verné, E., Perdika, P., Korkusuz, F., Minguella, J.** *Bioactive trabecular-like coatings to improve the osteointegration of ceramic prosthetic devices*. CORS 2013: 8th Combined meeting of Orthopaedic Research Societies. 13-16 Octubre de 2013. San Servolo, Venècia, Itàlia. [Comunicació oral i publicació a proceedings].
2. **Montealegre, M.A., Baino, F., Arias, J.L., Minguella, J., Vitale-Brovarone, C., Marshall, M.** *Bioactive glass coatings on Al₂O₃-ZrO₂ composite substrates by laser cladding for orthopaedic applications*, In: Proceedings of the 32th ICALEO Congress, ICALEO - 32th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Miami (FL), EUA. 6-8 d'Octubre de 2013, pp. 7, 2013. [Comunicació oral i publicació a proceedings].
3. **Minguella, J., Cuiñas, D., Martínez, M., Uceda, R., Vivancos, J., Buj, I.** *Development of a tailored manufacturing route for the fabrication of advanced ceramic cups with biomedical applications*. Publicat a: "From the design to the application of biomaterials". XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013). Book of Abstract, J. San Roman, J. A. De Pedro, B. Vazquez, L. Garcia (ESP), XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013), Madrid 8-12 de Setembre de 2013, pp. 1, 2013, ISBN: 9788469578315. [Poster i publicació a proceedings].
4. **Baino, F., Minguella, J., Verné, E., Vitale-Brovarone, C.** *Smart glass-derived coatings to improve the osteointegration of ceramic prosthetic devices*. Publicat a: "From the design to the application of biomaterials". XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013). Book of Abstract, J. San Roman, J. A. De Pedro, B. Vazquez, L. Garcia (ESP), XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013), Madrid 8-12 de Setembre de 2013, pp. 1, 2013, ISBN: 9788469578315. [Comunicació oral i publicació a proceedings].
5. **Cuiñas, D., Vitale-Brovarone, C., Minguella, J., Rodriguez, J.V., Korkusuz, F.** *Design for Deformation of Advanced Ceramic Cups for Acetabular Multilayer Prostheses*. Publicat a: "From the design to the application of biomaterials". XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013). Book of Abstract, J. San Roman, J. A. De Pedro, B. Vazquez, L. Garcia (ESP), XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013), Madrid 8-12 de Setembre de 2013, pp. 1, 2013, ISBN: 9788469578315. [Comunicació oral i publicació a proceedings].
6. **Montealegre, M.A., Baino, F., Arias, J.L., Minguella, J., Vitale-Brovarone, C., Marshall, M.** *Bioactive glass-ceramic coatings and structures on Al₂O₃-ZrO₂ composite substrates by laser cladding for orthopaedic applications*, Publicat a: From the design to the application of biomaterials. XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013). Book of Abstract, J. San Roman, J. A. De Pedro, B. Vazquez, L.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

- Garcia (ESP), XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013), Madrid 8-12 de Setembre de 2013, pp. 1, 2013, ISBN: 9788469578315. [Comunicació oral i publicació a proceedings].
7. **Vitale-Brovarone, C., Montealegre, M.A., Minguella, J. Orlygsson, G., Cavallero, C., Korkusuz, F., Kirk, N.** *Monoblock Acetabular Cup with Trabecular-like Coating (MATCH)*. Publicat a: "From the design to the application of biomaterials". XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013). Book of Abstract, J. San Roman, J. A. De Pedro, B. Vazquez, L. Garcia (ESP), XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013), Madrid 8-12 de Setembre de 2013, pp. 1, 2013, ISBN: 9788469578315. [Comunicació oral i publicació a proceedings].
 8. **Minguella, J., Cuiñas, D., Rodríguez, J.V., Vivancos, J.** *Advanced Manufacturing of Ceramics for Biomedical Applications: Subjection Methods for Biocompatible Materials*. The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013. Procedia Engineering. Volume 63, 2013, Pages 218–224. [Comunicació oral i publicació accessible en línia a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.219>]
 9. **Arjona, J., Minguella, J., Compeán, F., López de Lacalle, L.N., Campa, F.** *Mechanistic model of flat end milling operation considering tool wear and coolant techniques on a Ti6Al4V-alloy*. The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013. [Comunicació oral i publicació accessible en línia al *Book of Abstracts* de la Conferència].
 10. **Gomà, J.; Diego, U.; Minguella, J.; Fenollosa, F.; Vivancos, J.** *Hypergraphs for the analysis of complex mechanisms comprising planetary gear trains and other variable or fixed transmissions*. Mechanism and Machine Theory, vol. 51 (2012), pàgs. 217-229. Elsevier, ISSN: 0094-114X [Publicació en Revista Indexada, Q2, SJR (2012), IF: 1.214]
 11. **Roure F., Pastor M.M., Ferrer M., Minguella J., Uceda R., Arjona A.** *Characterisation of test results of the performance of additive manufacturing parts obtained by selective laser sintering processes incorporating glass and carbon fibres*. 37th MATADOR International Conference. Manchester, R.U., 25-27 de Juliol 2012 [Comunicació oral i publicació accessible en línia per Springer-Verlag]
 12. **Gomà, J.; Vivancos, J.; Minguella, J.; Diego, U.; Fenollosa, F.** *Power transmitted through a particular branch in mechanisms comprising planetary gear trains and other fixed or variable transmissions*. Mechanism and machine theory, vol. 46, núm. 11 (2011), pàgs. 1744-1754. Elsevier, ISSN: 0094-114X [Publicació en Revista Indexada, Q1, SJR (2011), IF: 1.366]
 13. **Fenollosa, F., Minguella, J., Gomà, J.R.** *Concurrent design and development of a chassis set for an electromechanical transmission system*. International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping. Leiria, Portugal, 6-10 d'Octubre de 2009. [Comunicació oral i publicació a proceedings. ISBN: 978-0-415-87307-9]
 14. **Gomà Ayats, J.R., Minguella-Canela, J.** *Development of a methodology for the materialisation of ceramic rapid prototypes based on subtractive methods*. Archives of Material Science 2007; 28:9-14. International OCSCO World Press, ISSN: 18972764 [Publicació en Revista Indexada, Q2, SJR (2012): 0.454]

1.6.3. Contribucions en Informes de Prospectiva

1. **Plataforma Tecnològica Española de Fabricación Avanzada “MANU-KET”:** *Escenario futuro de la fabricación de alto valor en España 2020. Contribución al Dominio 3: Empresas Digitales, Virtuales y Eficientes.* Madrid, 2014 [Actualment en preparació, Publicació disponible en línia prevista a la plana web de la Plataforma Tecnològica www.manufacturing-ket.es]
2. **Grup Connect-EU “Factories del Futur”:** *Strategic Agenda for the Manufacturing Sector in Catalonia 2010-2013. ICT-Enabled Intelligent Manufacturing: Digital Factories, Virtual Factories, Smart Factories and Ambient Intelligence.* Barcelona, 2012 [Publicació disponible en línia a la plana web del grup de Connect-EU www.fdf.cat]

1.7. Abast i contribució de la Tesi

Tal com s'ha comentat en els apartats anteriors, l'abast de la present Tesi Doctoral recull la labor de formalització d'algoritmes d'exploració del món i de la realització de tasques per tal de contribuir a la implementació de solucions altament flexibles de fabricació, de manera que siguin capaços d'analitzar i desxifrar el seu entorn per a posteriorment interactuar amb ell i dur a terme les tasques que li siguin encomanades.

En consonància amb aquest objectiu principal, la present Tesi Doctoral també pretén posar de manifest la amplitud del concepte de Fabricació Intel·ligent, tot donant una rellevància especial a procediments i metodologies de fabricació que han estat desenvolupats per donar resposta a les necessitats productives per a productes amb requeriments especials; com per exemple productes amb requeriments sanitaris i de fiabilitats elevats com ara els de l'àmbit biomèdic o fins i tot productes amb requeriments de cost necessàriament molt baix i fabricació extremadament ràpida com els del món de la joguina.

D'aquesta manera, en els diferents Capítols i Annexes, s'ha tractat de recollir multitud d'experiències fruit de treballs en projectes de Recerca pròpia i en col·laboració amb empreses i altres centres públics i Universitats tant de l'àmbit Nacional com Internacional en matèria de fabricació intel·ligent, personalització de producte i mètodes i processos de fabricació mitjançant sistemes “poc convencionals”.

Altrament, les revolucions tecnològiques produïdes per la informàtica i les telecomunicacions estan canviant moltes coses en relació a (i) què es produeix, (ii) on es produeix i (iii) com es produeix. Per això, la present Tesi Doctoral també ha volgut explorar les implicacions d'aquests canvis, que encara estan per venir, com per exemple seran la democratització dels sistemes de la producció, la producció local i el canvi logístic imposat per passar de transportar productes finals a transportar matèries primeres i moltes altres que canviaran la manera de viure en un nou món global i interconnectat.

Capítol 2. Estat de l'art

2.1. Estacions de Treball de configuració ràpida

2.1.1. Introducció a les Tecnologies “Agile Manufacturing”. Naixement del Concepte de la Fabricació Àgil.

Les tecnologies de producció basades en sistemes de configuració ràpida són, des del punt de vista històric, relativament joves. De fet, tal i com apunta Kidd^[4], la primera aparició del terme “*Agile Manufacturing*” va ser en un article publicat el 1991 als EUA pel llavors recentment constituït *Jacocca Institute*^[5]. Segons aquest institut, un sistema de producció es considera àgil si és capaç d'adaptar-se ràpidament als canvis del seu entorn. Dit d'altra manera, els sistemes àgils són bons en abordar situacions no previsible i poden treballar de forma no determinista.

En els sistemes de producció àgils, no cal explicitar tots els passos a realitzar en el procés productiu; ni tan sols cal treballar sempre amb el mateix tipus de peces o productes. Els sistemes àgils són capaços de treballar amb condicions no definides completament i a més tenen capacitat per a reaccionar davant de canvis inesperats.

Molts autors, com el mateix Kidd^[4] o Gould^[6] (1997), expliquen el moviment “àgil” dels Estats Units com una resposta amb interessos comercials i de defensa. Segons ells, després de l'acabament de la guerra freda, el Departament de Defensa dels EUA va reconèixer que les empreses dedicades a la producció de béns amb finalitats militars havien de canviar el seu posicionament per a passar a produir béns de consum d'interès general. Malgrat això, el govern demanava que aquestes empreses mantinguessin una certa flexibilitat per a que en cas d'un nou conflicte, poguessin tornar a la seves tasques anteriors.

De fet, les definicions més puristes de “*Agile Manufacturing*” són aplicades eminentment a la gestió organitzativa; és a dir, com un model de funcionament empresarial. Per exemple Nelson i Harvey^[7] definien el 1995 el terme Agilitat com “*una capacitat d'una organització per a respondre ràpidament i de forma efectiva a oportunitats no previstes i desenvolupar solucions proactivament per a les necessitats potencials*”. Aquesta idea, d'una forma més general i més aplicable a les estacions de treball, ja havia estat tractada un any abans per Dove^[8] (1994): “*Ser àgil vol dir ser proficient en el canvi i donar capacitat a l'organització per a fer el que vulgui quan ho vulgui*”.

Per a alguns autors, com Naylor et al.^[9] (1999) o Naim i Gosling^[10] (2011), el concepte de “*Agile Manufacturing*” s'hauria de combinar de manera natural amb la innovació que radica en el concepte de “*Lean Manufacturing*”, el qual designen tot fent servir el terme “*Leagility*”. Si bé la fabricació “Lean” (entesa com una filosofia per orientar totes les activitats d'una empresa a generar valor per al client i per tant per eliminar tot allò que suposi una despesa arbitrària) està especialment concebuda per donar resposta a necessitats de mercat amb poca varietat i variabilitat de producte, la fabricació àgil està formulada per al cas complementari: alta varietat i alta variabilitat dels productes demandats. D'aquesta manera, alguns autors com Inman et al.^[11] (2011) relacionen la filosofia àgil amb altres disciplines com ara el “*Just in*

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Time" (JIT, de l'anglès, que s'enfoca al nivell d'estoc zero i a la fabricació "just en el moment que es produeix la demanda") i fins i tot alguns com Sarkis^[12] (2001) descriuen la fabricació àgil com la suma de la filosofia "*lean*" amb l'aplicació de sistemes de fabricació flexibles.

Aquesta idea de tan ampli espectre encara és vigent actualment. Per aquest motiu, alguns autors segueixen abordant en els darrers anys l'aplicació dels paradigmes de funcionament àgil a diferents aspectes empresarials molt relacionats amb la fabricació i la cadena de valor. Així, Pan i Nagi^[13] (2013) desenvolupen el disseny de cadenes de subministrament per a la fabricació àgil mentre que Zandi i Tavana^[14] (2011) descriuen aplicacions de QFD (de l'anglès "*Quality Function Deployment*"; és a dir, Desplegament de Funció de Qualitat) per a sistemes CRM (de l'anglès "*Customer Relationship Management*"; és a dir, per a la gestió adequada dels clients) en empreses amb focus en la fabricació àgil.

L'efecte de l'aplicació d'aquestes tècniques aporta conseqüències clares sobre el resultat operatiu de les empreses, si bé és necessari tenir molt en compte les característiques concretes de les organitzacions on es vol aplicar per tal de poder fer-ho correctament. En aquest camp, són notables les contribucions de Vázquez-Bustelo i Avella^[15] (2006), que ofereixen una comparativa de l'aplicació de la fabricació àgil en quatre empreses implantades a l'estat espanyol i també el treball de Zhang^[16] (2011) que considera tres tipus bàsics d'adopció d'estratègies per a l'agilitat: rapidesa, resposta i proactivitat.

Pel que fa a la utilització de sistemes àgils i *lean* de manera combinada, es pot trobar altra contribució destacable de la mà d'Elmoselhy^[17] (2013), que elabora un cas d'aplicació tècnica específica per al sector de l'automòbil. En aquest cas, l'autor crea una proposta d'implementació tècnica basada en quatre pilars: Factoria flexible, E-fabricació fractal global, Estratègies innovadores de cadena de subministrament i Disseny d'estratègies de fabricació dinàmiques.

Amb tot, per mantenir un enfocament no esbiaixat cap a algun dels camps d'aplicació del concepte, d'ara en endavant es farà referència a sistemes àgils o de configuració ràpida com a sistemes en els quals les tasques es plantegen en un nivell d'abstracció elevat; és a dir, sistemes en els quals les especificacions a realitzar per l'usuari són mínimes. Una estació de fabricació àgil serà capaç de fabricar peces amb condicions no plenament deterministes i serà capaç de passar a fabricar peces diferents efectuant només una reconfiguració mínima: la agilitat implica configuració ràpida. Dit d'altra manera, una *Arquitectura Àgil de Fabricació* ha d'aspirar a materialitzar qualsevol peça que requereixi les operacions per a les quals l'estació és definida.

2.1.2. Característiques presents en els sistemes de configuració ràpida

Les característiques dels sistemes àgils han estat estudiades i especificades per molts autors. Per exemple, en els treballs de Kidd mencionats a l'apartat anterior (1994^[18] i 1995^[4]) i pel que fa a l'aplicació dels sistemes àgils de producció, hi apareixen definicions de les característiques que diferencien els sistemes àgils d'aquells que no ho són. D'una forma més concreta, els requisits que es demanen als sistemes àgils poden ser postulats tal i com es presenten a continuació.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

- Resposta Ràpida

Un sistema àgil de producció ha de ser capaç de posar-se en funcionament de manera ràpida. Això vol dir que un cop presa la decisió de començar la producció d'un determinat producte, el sistema ha de ser capaç de posar-se a funcionar el més aviat possible.

En aquest sentit, no serà un sistema de producció àgil aquell sistema automàtic que requereixi la implementació d'un programa massa extens o en el qual la pròpia metodologia de programació la faci llarga i complicada. Igualment, no serà un sistema àgil aquell que requereixi multitud d'instal·lacions de cablejat, motlles i utilitatges específics per a cada ordre de producció que es llanci i per tant que consumeixi gran quantitat de temps en implementar canvis.

D'altra banda, un sistema àgil ha de tenir l'habilitat de deixar de fabricar un producte per a passar a fabricar-ne un altre en el mínim espai de temps, minimitzant el temps perdut degut a tenir les màquines aturades.

- Adaptabilitat

Una altra característica que defineix un sistema com a àgil és que aquest sigui capaç de produir multitud de productes diferents. Aquesta capacitat d'adaptar-se als canvis, ha de fer que el sistema respongui adequadament quan les peces de partida passin a ser lleugerament diferents (que no s'equivoqui si tot d'una, per qüestions d'utilització posterior del producte, algunes de les peces passen a tenir una determinada ranura extra, per exemple).

L'adaptabilitat també ha de facilitar els canvis d'escala dels productes. Si es pren la decisió de produir un mateix producte amb dimensions més grans, pot ser que alguna peça hagi de ser manipulada de manera diferent. En aquest cas, un sistema àgil canviaria el seu mode d'operació per a adaptar-se a la nova realitat.

- Reconfigurabilitat

En determinades ocasions, el procés productiu, la naturalesa de les peces, o altres requisits com ara la distribució en planta, poden obligar a modificar la distribució física del procés productiu. Un sistema àgil ha de ser reconfigurable per a que permeti disposar els elements de la manera més apropiada i en el moment que sigui necessari. A més, ha de permetre la incorporació d'elements complementaris com ara utilitatges (tot i que ha de buscar la simplicitat i per tant, la tendència ha de ser minimitzar el nombre d'aquests).

En la reconfigurabilitat, s'hi inclou implícitament la noció de "modularitat". Efectivament, com més estandarditzades estiguin les connexions, com més intercanviables siguin els components del sistema i quants menys tipus diferents se n'utilitzin, més simple serà la reconfiguració i més variants diferents se'n podran obtenir.

- Robustesa

Un sistema de producció àgil ha de ser robust en el sentit que no s'ha de quedar bloquejat davant de la incertesa. Per exemple, en una estació de treball àgil, si una peça arriba en una posició incorrecta, el sistema ha de ser capaç de determinar quin canvi de posició ha de realitzar per a col·locar-la correctament.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

A més, un sistema àgil ha de ser bo buscant alternatives. Per exemple, si necessita una peça que no es troba en el contenidor adequat, el sistema ha de realitzar la cerca en la resta de contenidors. La robustesa va orientada al desenvolupament de la autonomia del sistema. Un sistema àgil i per tant robust, serà capaç de mantenir un mínim de producció sense supervisió externa.

- Transformació del coneixement

La funcionalitat de robustesa va associada a la capacitat del sistema per a “aprendre” sobre el procés que realitza. Així, si per a realitzar un canvi de posició d'una peça es poden efectuar dues combinacions diferents de moviments; el sistema, a base de la pròpia experimentació, ha de ser capaç de determinar quina és la millor en quant a estalvi de temps.

La màxima expressió del coneixement arriba amb els paradigmes de la programació sense programa, on els sistemes són capaços de realitzar multitud d'operacions diferents amb el mínim d'instruccions possibles. En ells, el sistema decideix quin procediment utilitzarà per a arribar al resultat final esperat.

- Cooperativitat

Una cèl·lula de producció àgil es pot obtenir a base d'integrar sistemes àgils que “es coneixen” entre sí. Per tant, els sistemes àgils han de ser capaços de treballar conjuntament per aconseguir dur a terme els processos encomanats no només a nivell individual, sinó també de forma cooperativa, de forma que se n'optimitzi el resultat global.

Un exemple clar és el treball conjunt de dos manipuladors: un amb un subensamblatge de peces i l'altre amb una nova peça a col·locar sobre la resta. Un sistema no cooperatiu es limita a portar el més aviat possible als dos manipuladors sobre una posició predefinida, mentre que un sistema cooperatiu decideix en quin punt mig es poden trobar de forma que es minimitzi el temps mort perdut en desplaçaments.

- Universalitat

Quan es defineix que un sistema productiu és àgil, cal determinar en què ho és; és a dir, quines operacions realitza. En aquestes operacions (tal i com ja s'ha definit), el sistema es podrà classificar com a àgil si és adaptable a les seves variants. En contraposició, el concepte d'Universalitat es defineix en quant a la quantitat d'operacions que poden ser realitzades pel sistema productiu.

Idealment, una estació de muntatge “universal”, hauria d'aspirar a realitzar totes les operacions de muntatge possibles. En realitat, el concepte d'Universalitat pot relaxar-se considerablement i ser entès com a maximitzar les operacions que du a terme amb el ben entès que en l'etapa de disseny del producte es poden prioritzar certes operacions.

A part d'aquestes característiques tècniques se'n poden trobar moltes d'altres enfocades des d'un punt de vista més general, referent a les propietats de les organitzacions (tal i com ja s'apuntava a l'apartat anterior). Gould^[6] (1997) o Christopher^[19] (2000) són bons exemples per a veure que el tema de la fabricació àgil ha anat prenent força en els darrers anys. Sense anar més lluny, els mateixos Avella i Vázquez-Bustelo^[20] (2005) diferenciaven entre les definicions de fabricació àgil en funció dels seus resultats (flexibilitat, rapidesa, capacitat de

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

resposta, reconfigurabilitat, dinamisme, etc) i definicions en funció de la seva operativitat o implementació (cooperació, productivitat, virtualitat, integració, etc.). A més, alguns autors també destaquen la importància d'incloure el "disseny àgil" en el propi procés de fabricació (Morien 2005^[21] o Kusiak 1997^[22]).

De totes formes, el concepte de fabricació mitjançant sistemes àgils és tan senzill com intentar emular el recurs productiu més flexible i reconfigurable que existeix en la actualitat: les persones. Es tracta d'implementar sistemes que siguin suficientment versàtils com per a efectuar operacions amb el mínim d'informació necessari i que siguin suficientment autònoms com per a que siguin capaços de produir sense supervisió.

A nivell de dispositius físics, a aquests sistemes productius se'ls ha de demanar destresa suficient (en anglès "*dexterity*") per aconseguir dur a terme operacions molt complicades i d'altra sincronització "muscular". Per això, el desenvolupament de sistemes de producció àgils és una tasca molt més complexa, doncs hi intervenen qüestions multidisciplinars relacionades entre d'altres amb la visió per ordinador, la subjecció i manipulació de peces, les operacions a realitzar, l'automàtica i la programació.

Per tal d'assolir l'alta flexibilitat i versatilitat i poder integrar tots els diferents sistemes, es fa palesa la necessitat d'incorporar sistemes de control avançats capaços d'anar més enllà del que es requereix en les cèl·lules de fabricació flexibles convencionals. Tal i com apunta Wooldridge^[23], els ordinadors són extremadament bons en fer allò que està explícitament descrit, anticipat, preparat i inserit en el codi. Malgrat això, tal com s'utilitzen en l'actualitat, els ordinadors no són gens bons en saber "què cal fer" i quan es troben davant de situacions no previstes pel dissenyador, els resultats solen no ser massa bons. Per a certes aplicacions, com són els muntatges altament flexibles, és necessari aconseguir que els sistemes tinguin capacitat per decidir per sí mateixos; és a dir, que es comportin com *Agents Intel·ligents*.

Els Agents són una de les solucions ofertes per les tècniques d'Intel·ligència Artificial que consisteixen en^[24] "*sistemes informàtics situats en un cert entorn, capaços d'actuar autònomament en aquest entorn de cara a assolir els objectius pels quals han estat dissenyats*". Els Agents són autònoms, interactuen amb altres agents, reaccionen davant canvis en l'entorn i prenen la iniciativa en l'assoliment de les seves fites.

Tal i com es mostra en l'apartat a continuació, la implementació d'arquitectures àgils de muntatge és un marc idoni per incorporar múltiples disciplines d'IA com ara^[25] Xarxes Neuronals, Lògica Difusa, Sistemes Experts i tècniques lligades al Reconeixement de Patrons.

2.2. Eines aportades per les diferents disciplines de la IA

La Intel·ligència Artificial, tal i com apunta McCarthy^[26] és la "*ciència i l'enginyeria de realitzar màquines intel·ligents, especialment programes*". Els primers treballs sobre màquines intel·ligents van començar a les acaballes de la Segona Guerra Mundial quan molts investigadors, com per exemple Turing^[27], van arribar a la conclusió que la millor manera de construir màquines intel·ligents era mitjançant programació informàtica, més que no pas a base de la materialització física de sistemes molt complexes.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

La programació i el sistema de control implicats en els sistemes de producció àgils són particulars per molts motius. D'una banda, són els elements últims que determinen la capacitat dels sistemes per a dur a terme processos productius. Dit d'altra manera, un sistema serà àgil si pot començar a treballar amb un mínim de temps, si es pot reconfigurar, etc., però només serà robust i capaç d'establir un ritme de producció elevat, si el seu sistema de control és suficientment avançat com per trobar solucions bones i ràpides per a problemes imprevistos.

D'altra banda, els sistemes de programació i control són particulars perquè la seva estructura ha d'estar dissenyada de forma que permeti emmagatzemar tota la informació necessària de l'execució del procés productiu i pugui ser descarregada per qualsevol agent físic.

Finalment, a diferència de les topologies convencionals de fabricació flexible, una cèl·lula de producció àgil no té una única unitat central ni cervell global; no obstant només té una interfície amb l'usuari (de cara a simplificar la seva utilització) que subministra informació a cada subsistema per a que aquests decideixin què fer i com fer-ho. Això és el que s'anomena "programació distribuïda" o "gestió mitjançant agents experts"^[28], doncs cadascun dels subsistemes –que és expert en el seu camp– gestiona les activitats dins del seu propi camp d'actuació. Per a cadascun d'aquests subsistemes, es poden aplicar i combinar diferents tecnologies aportades per les eines de la IA. En els apartats a continuació es descriuen quines solucions específiques s'han utilitzat en els darrers anys, en funció de les competències contingudes en les arquitectures àgils de muntatge.

2.2.1. Disseny intel·ligent de Cèl·lules de Fabricació Flexible (FMS)

Aprofitant les tècniques de Disseny Assistit per Ordinador (CAD) i de les eines de simulació existents en el paradigma actual de la tecnologia, no és estrany que el disseny de FMS sigui abordat amb l'ajut d'eines intel·ligents, capaces de combinar el disseny físic (de distribució en planta i de materialització de processos) amb l'anàlisi de les diferents mesures d'eficiència requerides (cadència de producció, temps de cicle, etc.).

Per exemple, l'any 1995 Kamrani et altri^[29] presenten una solució al problema de selecció òptima de robots per a la implantació d'una Cèl·lula de treball, mitjançant la construcció d'un *Sistema Expert Basat en el Coneixement* (KBES).

Un *Sistema Expert*^[30] és un sistema informàtic que "imita el comportament d'un expert humà, realitzant una tasca intel·lectual dins un camp determinat". A diferència d'un programa informàtic ordinari, un Sistema Expert pot en tot moment: (i) *Explicar el seu comportament* i (ii) *Rebre nous coneixements sense necessitat de nova programació*. Un Sistema Expert està format per una base de coneixements (que recull les dades i les regles demostrades) i un motor d'inferència (que llança les regles a utilitzar i actualitza la base de coneixements). L'avantatge d'aplicar Sistemes Experts en la implementació d'Arquitectures Àgils és que poden donar assistència en la planificació d'activitats, les distribucions en planta, la supervisió de variables de procés, el manteniment i la diagnosi de fallides de màquina.

D'altra banda, Chan et altri (2000)^[31] presenten un sistema que integra simulació i tècniques de presa de decisions multicriteri per a resoldre el problema de disseny i selecció d'alternatives

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

en la resolució de problemes de muntatge. En concret, desenvolupen una metodologia que integra, a més del mòdul de simulació numèrica, tres sistemes independents basats en IA: un *Sistema Expert*, una eina de *Lògica Difusa* i una eina de *Xarxes Neuronals*. En aquesta metodologia, el *Sistema Expert* s'utilitza en el disseny inicial així com al final del procés per a assegurar que el disseny aconsegueix els objectius de partida, mentre que la *Lògica Difusa* i les *Xarxes Neuronals* per la seva banda, serveixen per ajudar a avaluar les diferents mesures de productivitat i eficiència. La *Lògica Difusa* i les *Xarxes Neuronals* són dues tècniques bastant populars per a analitzar dades. Concretament, la *Lògica Difusa* és útil per a la mesura de preferències, mentre les *Xarxes Neuronals* se solen utilitzar per a analitzar relacions multivariants i resoldre problemes no lineals.

La Lògica Difusa^[32] (en anglès "*Fuzzy Logic*") és segons Zadeh^[33] una "*metodologia de programació basada en paraules*". Certament, la Lògica Difusa (LD) és una eina aportada des de la IA que treballa amb incertesa matemàtica per a combinar coneixement i disseny en programes que esquiven els models matemàtics rigorosos. La LD permet la creació de prototipus funcionals molt bàsics i la seva posterior extensió incremental per a afrontar reptes més complexos.

Les Xarxes Neuronals Artificials (o XN), per la seva banda, consisteixen en la utilització conjunta de moltes unitats computacionals artificials anomenades "*neurons*" per l'analogia amb les cèl·lules nervioses humanes. Les XN tracten d'imitar el comportament del cervell humà. Cada neurona en una XN processa en sortides les entrades que li arriben, les quals són traspassades a altres neurones. D'aquesta manera, totes les senyals d'entrada entren per un nivell d'entrada (interfície amb l'usuari) i acaben sortint pel nivell de sortida després de passar pels diferents nivells ocults en la xarxa (Veure Figura 2.2-1).

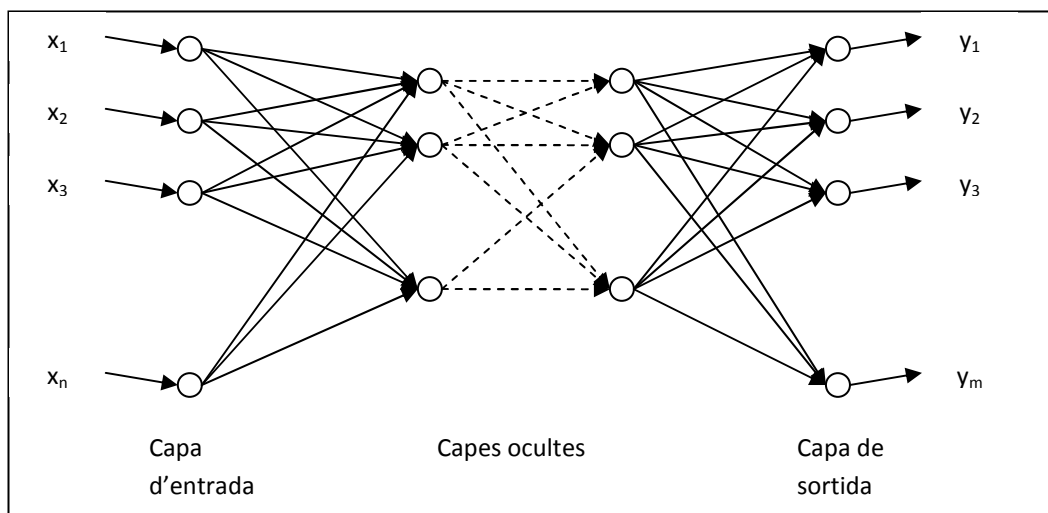


Figura 2.2-1. Xarxa Neuronal multicapa. Reproducció de ^[34]

Les Xarxes Neuronals, especialment les xarxes multicapa, són molt utilitzades en el camp del reconeixement degut a la seva competència en l'aprenentatge. La combinació de les tècniques de *Lògica Difusa* i *Xarxes Neuronals* en una sola aplicació dóna lloc al que en anglès s'anomenen "*NeuroFuzzy Technologies*".

Altres aplicacions d'aquestes tècniques són les utilitzades per Cheng et al. quan l'any 1998, presenten ^[35] una implementació de Fabricació Àgil basada en la utilització de tècniques d'IA

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

combinada amb l'ús d'Internet. Aquesta aproximació, se serveix d'una Xarxa Neuronal que treballa conjuntament amb un mòdul de Lògica Difusa per a seleccionar rodaments per a aplicacions mecàniques amb una sèrie de requeriments específics, alhora que troba i ofereix informació sobre el procés de fabricació necessari.

L'ús d'Internet en aquesta aplicació és fonamentalment el d'actuar com a font d'informació per al sistema, de manera que pot anar actualitzant el coneixement i estar al dia de les solucions de mercat en producte i procés.

2.2.2. Planificació Intel·ligent d'operacions de muntatge

Altres camps dins les Arquitectures Àgils de Muntatge on estan essent aplicades tècniques de IA són la generació de seqüències de muntatge i la planificació de les activitats que componen els diferents processos. Tot i que en l'actualitat el disseny en CAD (Disseny Assistit per Ordinador, acrònim de l'anglès "*Computer Aided Design*") i el processat en CAM (Fabricació Assistida per Ordinador, acrònim de l'anglès "*Computer Aided Manufacturing*") són eines àmpliament acceptades i comunament utilitzades a la indústria, el pas entre una i altra tecnologia es realitza habitualment mitjançant la intervenció d'experts humans.

És per això que investigadors com Rabemanantsoa i Pierre^[36] han cercat solucions per afrontar la generació de seqüències d'ensamblatge partint de models en CAD. Per a aconseguir-ho, els autors defineixen una metodologia basada en un Sistema Expert capaç de realitzar una abstracció de les operacions necessàries per a obtenir una determinada peça final a partir del seu dibuix en CAD (concretament en Pro-Engineer). D'aquesta manera, es conforma una estructura en arbre que arriba fins a l'especificació CAM de les operacions gràcies al treball d'un motor d'inferència sobre una base de coneixement orientada a objectes.

La modelització orientada a objectes mitjançant tècniques d'intel·ligència artificial és una eina molt potent i d'aplicació directa a la implementació d'Arquitectures Àgils de Muntatge. Concretament, la representació de processos mitjançant *Xarxes de Petri* ofereix un marc idoni per a la presa de decisions i la millora de la efectivitat i qualitat en la materialització de muntatges.

Les *Xarxes de Petri* ^[37] són una eina molt potent de descripció funcional de sistemes seqüencials i concurrents. Les anomenades *Xarxes de Lloc-Transició* són representacions de grafs que contenen nodes "P" –o llocs-, nodes "T" –transicions- i nodes "A" –arcs, que connecten llocs amb transicions-. En una xarxa estàndard cadascun dels arcs s'avalua amb un pes, cosa que permet ponderar-los entre ells. Aquestes xarxes són molt útils per a sintetitzar els sistemes amb el mínim d'informació possible i facilita la representació d'evolucions simultànies (Veure Figura 2.2-2).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

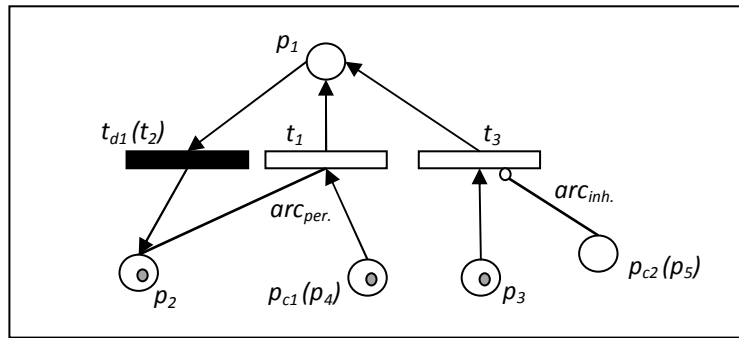


Figura 2.2-2. Exemple de graf de Xarxa de Petri basada en el coneixement. Els llocs (nodes “p”) es representen per cercles i les transicions (nodes “t”) per rectangles. Reproducció de [38].

L’any 2000, Zha^[38] presenta una metodologia de integració intel·ligent de disseny i planificació de l’ensamblatge. Aquesta metodologia es basa en un tipus de Xarxes de Petri anomenades *Xarxes de Petri Orientades a Objectes Basades en Coneixement* (OOKPN’s) que incorporen *Sistemes Experts basats en el Coneixement* (KBES) i Lògica Difusa. L’avantatge d’aquestes OOKPN’s respecte a Xarxes de Petri convencionals és que contenen “anotacions de coneixement”; és a dir, que poden emmagatzemar i utilitzar regles de raonament. Les anotacions de coneixement en Xarxes de Petri engrandeixen el rang de representació de continguts del graf inicial i poden ser utilitzats com una base de coneixement per un motor d’inferència. Llavors, la integració de Lògica Difusa porta cap a l’extensió natural dels *Sistemes Experts Difusos*. La implementació informàtica d’aquesta eina duta a terme per Zha consisteix en una xarxa d’agents intel·ligents interconnectats, cadascun dels quals és una OOKPN amb capacitat per solucionar problemes, aprendre i resoldre conflictes.

L’any 2003, Yu et altri^[39, 40] postulen un nou tipus de Xarxes de Petri, les “*Buffer-Nets*” o “*B-Nets*” amb l’objectiu de modelar i poder controlar el funcionament de Cèl·lules de Fabricació Flexible. La particularitat d’aquestes B-Nets és doble: d’una banda, incorpora la variable “temps” aplicada tant a nodes “P” o “T” (espais o transicions) i de l’altra divideix els nodes “P” entre Recursos “R” i Pulmons “Q” (en anglès, “*buffers*”). A partir d’aquesta postulació, els autors desenvolupen diversos nous algorismes de planificació d’activitats que combinen la caracterització mitjançant “*B-Nets*” i metodologies híbrides de cerca heurística.

2.2.3. Construcció de teories de l’entorn i de sí mateixos: Aprenentatge i Comportament de sistemes intel·ligents

En addició al que s’ha vist en els apartats anteriors dins les tècniques d’Intel·ligència Artificial i també en la implementació d’Arquitectures Àgils de Fabricació, existeix un repte que va més enllà de la realització de dissenys o planificació d’operacions: l’aprenentatge autònom per part del sistema de *com* està format el Món: *el seu entorn i el propi sistema en sí*. Efectivament, un repàs a la bibliografia revela que l’aprenentatge a partir de l’experimentació i dels models de conducta en funció de les característiques dels models del món, sistema i entorn ha estat abordat des de moltes vessants diferents que van des de la filosofia fins a la informàtica.

L’aprenentatge, tal i com senyala Azevedo^[41], és un “*fenomen complex que inclou una interacció intricada i complexa entre processos neurals, cognitius, motivacionals, afectius i*

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

socials". Quan l'aprenentatge es du a terme mitjançant tècniques d'IA, els problemes solen derivar de la heterogeneïtat i massificació de dades "*percebudes*" pels sistemes.

L'any 1999 Gomà i Vivancos [3] presenten un model per a la construcció d'una teoria lògica de l'entorn d'un robot i de sí mateix a través d'experiments. Aquest model es basa en la hipòtesis que el món està poblat per objectes, els quals tenen una llista finita d'estats possibles. A més, la seva relació amb l'entorn es realitza a partir de sensors i accionaments, materialitzats per funcions de percepció i funcions de canvi d'estat.

Aquesta modelització està basada en una suposició plenament determinista del món, on per cada instant de temps existeix una teoria completa que determina l'estat de tots els objectes del món en l'instant de temps següent. A més, com que el model és complet i finit, el sistema pot aprendre les lleis que governen el seu món a base de realitzar tots els experiments possibles combinant les diferents funcions de canvi d'estat en els diferents estats, utilitzant la seva percepció de l'entorn i el seu canvi.

A nivell lògic, cal també parar atenció a les possibles inconsistències dels models elaborats. Weber i Christiaens[42] postulen l'any 1999 com estan estructurats i com funcionen els models descriptius del món creats pels humans. Els autors, a més de mencionar el determinisme de totes les variables que componen el món i la completesa de les seves propietats des d'un punt de vista d'ontologies[iv], comenten el procés d'adaptació de models del món.

Aquest procés d'adaptació diu que els models del món es construeixen interactuant amb una base que conté una sèrie de creences científiques i metafísiques (base del coneixement). Els canvis en aquesta base, porten a l'articulació de nous principis que sovint són discordants amb alguns dels principis que formen el model del món. Llavors, el sistema ha de decidir quins principis rebutja o bé adoptar un model inconsistent. Segons els autors, l'objectiu final dels canvis en el model del món ha de ser minimitzar el nombre de regles, alhora que es maximitzen el nombre de conclusions obtingudes.

Tanvir i Okabe[43], presenten el 2004 una nova norma d'aprenentatge mitjançant *Xarxes Neuronals* que efectuen experiments i n'avaluen les conseqüències realitzant una comparació de tipus llaç tancat en relació amb els objectius previstos inicialment. Per tal de discriminar entre les variables de treball, els autors implementen una norma d'aprenentatge anomenada "*Error Based Weight Update*". Aquesta norma consisteix en avaluar quines senyals tenen una influència més important en l'error percebut respecte als objectius desitjats (sistemes d'aprenentatge basats en anàlisi de gradients) conformant una base amb la qual discriminar quines senyals cal atacar primer per arribar als objectius fixats.

- Comportament dels Agents

Quan es tracta la intel·ligència en els sistemes, una part que va lligada als processos d'aprenentatge són els processos que expliquen el propi comportament dels agents. L'any 1995, Lespérance i Levesque[44] presenten una *teoria de coneixement i acció* per mitjà de la lògica modal, que tracta la diferència entre coneixement "indexical" i coneixement "objectiu" i permet una especificació apropiada dels requisits del coneixement i els efectes de la seva acció. Aquesta diferència correspon bàsicament en discernir quins aspectes del coneixement

[iv] **Completesa Ontològica:** Un sistema físic en un instant de temps 't', posseeix la propietat 'P' o bé 'no P'.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

s'han d'especificar i quins poden ser evitats, de manera que els agents puguin ometre la informació no estrictament necessària.

Els propis autors postulen aquest fet de la manera següent: “...algú pot dir que en Joan sap que en Pol sap quina hora és sense necessitat que en Joan sàpiga quina hora és”. Aquesta teoria, simplifica en gran manera les necessitats de coneixement dels agents implicats en Arquitectures Àgils de Muntatge de manera que “un agent no necessita saber realitzar una acció per a poder assolir una fita, només necessita saber quin altre agent la pot fer i que fent-la, la fita serà assolida necessàriament”.

Efectivament, tal i com apunten Aguirre i González(2003)^[45], en els sistemes que estan destinats a realitzar accions contingudes en un pla és habitual introduir una relació entre els conceptes abstractes del pla i els objectes reals de l'entorn que són detectats pels sensors. En aquest cas, la *percepció* es realitza en *funció de les necessitats*; és el que en anglès s'anomena “*need-to-know basis*”, ja que la percepció està íntimament lligada a les accions que el robot necessita realitzar.

En el seu treball, Aguirre i González implementen en un robot mòbil un model de percepció mitjançant tècniques de Lògica Difusa que rep senyals de diferents sensors i en discrimina la informació determinant quin tipus d'objectes té al seu davant (parets, passadissos, cantonades, habitacions, etc.). Aquesta informació de l'entorn permet al robot representar un mapa topològic que pot ser utilitzat posteriorment per a fer plans de desplaçament entre posicions inicials i finals.

Aquest treball intenta respondre a una problemàtica similar a la de Balakrishnan et altri(2000)^[46], els quals aborden l'aplicació de Xarxes Neuronals per a convertir les dades provinents d'un sensor làser incorporat en l'extrem d'un robot en un *Vector de Característiques* de l'entorn (en anglès “*Feature Value Vector*”). La informació generada s'aplica per a donar precisió al reconeixement i determinació de la posició de peces facilitant un *ensamblatge robòtic intel·ligent*.

El gruix de la literatura, doncs, aborda la conducta dels sistemes modelant-la sempre a partir d'unes mateixes normes o principis que es mantenen constants al llarg del temps. Dengyong i Ruwei (2002)^[47] simulen el comportament d'una criatura artificial en un món complex, dinàmic i advers creat per ordinador. La criatura de l'experiment té definits una sèrie d'objectius que van canviant de prioritat al llarg del temps (alimentar-se, escalfar-se, etc.). Els canvis de prioritat dels objectius propicien que la criatura canviï la seva conducta per adaptar-se a les seves necessitats, d'acord amb els canvis de l'entorn.

En aquesta mateixa línia, altres autors com Grant et alt.^[48] estenen el 2005 la representació de la formació d'intencions al cas d'agents que treballen en entorns cooperatius. Mitjançant un model lògic, els autors tracten com evolucionen les intencions dels agents amb el temps i les condicions sota les quals un agent pot adoptar i mantenir una conducta determinada.

La interpretació del món a partir d'experiments i mesures sensorials i la definició de la conducta dels sistemes a partir de models de comportament dinàmics són doncs dues components clau per al desenvolupament d'arquitectures de treball que vagin més enllà d'automatitzacions plenament deterministes.

2.3. Implementacions en cèl·lules de fabricació altament flexibles

El tercer pilar del marc adreçat per la present Tesi Doctoral correspon a la implementació efectiva d'arquitectures de fabricació per a la producció de productes. Per aquest motiu els apartats a continuació descriuen a tall d'exemple diversos treballs rellevants en matèria de posada en funcionament de sistemes de producció.

2.3.1. Estudis tècnics de Recerca i Desenvolupament sobre Fabricació Àgil

Deixant de banda l'enfocament de "Agile Manufacturing" com a "gestió àgil" d'organitzacions; una revisió de la literatura publicada durant els darrers vint anys revela que la materialització tècnica dels processos àgils de fabricació també s'ha abordat en gran manera durant aquests darrers anys. De fet, són nombrosos els grups que han abordat el desenvolupament de sistemes àgils de producció; alguns com a intent de millora de sistemes de fabricació flexible actuals (limitant-se només a estudiar subsistemes com ara l'alimentació, la subjecció, la manipulació, etc.), però també alguns altres intentant dissenyar sistemes completament nous (les *Workcells* o les *Architectures for Agile Assembly: AAA's*).

Els grups que s'han dedicat a dissenyar subsistemes no són, en general, grups dedicats específicament a la R+D+i en matèria de tecnologies de producció. Normalment es tracta de laboratoris d'informàtica i robòtica emmarcats dins d'Universitats d'arreu del món i que tenen altres línies de treball molt diferents. Com a exemples amb troballes destacables de grups que s'han dedicat a estudiar subsistemes separadament es poden trobar l'ERL de Canadà (1996^[49] i 1997^[50]) amb els seus estudis sobre els manipuladors, la University of Toronto (2000^[51]) en sistemes de control o la Kobe University (2000^[52]) referent a la gestió de la producció mitjançant cèl·lules de treball diferenciades.

D'altra banda, molts altres grups han arribat a desenvolupar estructures productives polivalentes altament cohesionades. Com a exemple es pot citar la Nanyang Technological University de Singapur, que té treballs de recerca en "Workcells" des d'abans del 1999^[53] i que han presentat en diversos congressos exemples físics de Cèl·lules de treball per a aplicacions mecàniques i altres prototipus de robots paral·lels.

Un altre grup que està aconseguint progressos notables és el Robotics Institute de la Carnegie Mellon University de Pittsburg, el qual porta més d'una dècada treballant sobre el concepte de les AAA's i està desenvolupant fortament la idea de les minifactories^[54]. Les minifactories són una extensió de les Arquitectures de configuració ràpida, de forma que queda difuminat on acaba una cèl·lula de treball i on en comença una altra. De fet, en una minifactoria el que s'hi troba són una sèrie de sistemes estàndard d'alimentació, subjecció transport intern i estructures modulares que serveixen per implementar un procés productiu al més pur estil "mecanno". Per tant, els seus avenços poden ser classificats des del punt de vista general o relatiu a cadascun dels subsistemes als quals pertanyen.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

2.3.2. Materialització d'Estacions de Muntatge Àgils basades en la interacció de sistemes complexos

Les solucions adoptades per a materialitzar arquitectures de muntatge àgils són molt variades i incorporen elements molt diversos. Com a norma general, totes elles tracten d'aprofitar els diferents sistemes per a realitzar múltiples funcions; per exemple, es fuig d'utilitatges de subjecció independents i s'incorporen en la implementació de les parts mòbils del sistema.

També, molts d'ells utilitzen robots manipuladors antropomòrfics no només per les seves prestacions, sinó també per la seva capacitat per a ser reutilitzats en diferents posicions si es canvia part o tot el procés productiu. Això possibilita realitzar muntatges de peces "al vol", en lloc de dipositar-les sobre una superfície de treball, però alhora complica el funcionament de les cèl·lules de treball en quant a la gestió del procés, les interferències i la restricció de les direccions en les quals es poden realitzar operacions.

El problema de la manipulació és de fet el factor que restringeix la capacitat total de la cèl·lula de fabricació. D'alguna manera, el nombre d'operacions que puguin ser realitzades pel manipulador (col·locació, cargolat, clipat, reblonat, etc.) i la precisió i la disposició amb que puguin ser realitzades restringirà la capacitat de l'estació (amb el ben entès que darrera seu hi actui un programa de control prou potent capaç de gestionar-lo). Per aquests motius, tots els grups de recerca que han treballat sobre el tema de les AAA's, han posat molt d'èmfasi en aconseguir sistemes de manipulació punters i útils que en molts casos incorporen en ells mateixos sistemes de visió per computador.

D'altra banda, molts grups s'han dedicat a implementar sistemes d'alimentació altament flexibles basats en cintes o vibradors, que són evolucions particulars de sistemes que s'utilitzen en l'actualitat. En aquest aspecte, es poden trobar sistemes d'alimentació que utilitzen palets i d'altres que simplement disposen els elements a dojo sobre cintes i utilitzen configuracions enginyoses per a posicionar-les o orientar-les d'una forma concreta. En qualsevol cas, la situació ideal per a aconseguir plena agilitat seria prescindir completament dels sistemes autònoms d'alimentació i adjudicar les seves tasques al propi sistema de manipulació amb l'ajut de la visió per ordinador; és a dir implementar estratègies de "bin-picking".

El "bin-picking"^[55, 56] consisteix en fer possible que un robot o un manipulador industrial agafi peces d'una en una directament de contenidors o altres espais on es troben emmagatzemades piles de peces idèntiques. Aquestes estratègies, que combinen la integració d'elements sensors i accionaments, fan possible prescindir d'elements alimentadors, tot augmentant la flexibilitat i reduint els elements necessaris en el sistema.

A continuació es presenten tres materialitzacions particulars d'Estacions de Muntatge Àgils realitzades els darrers anys per diferents grups de recerca d'àmbit internacional.

- i) Estació de Muntatge Automàtica assistida per Visió per Ordinador – GUT [57-58]

Un primer exemple d'estació de muntatge que combina la interacció de diferents sistemes; en concret braços de robot antropomòrfics, sistemes de visió estereoscòpics i llocs de treball amb alimentadors automàtics és el sistema desenvolupat pel *Dept. of Computer Graphics and Vision* de la *Graz University of Technology* (GUT) a Alemanya.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

El prototipus d'estació de muntatge desenvolupat per aquest grup (veure Figura 2.3-1) aborda el problema de la implementació d'arquitectures de treball capaces de muntar productes amb peces que inicialment es troben apilades en un contenidor. Per a aconseguir-ho, els autors implementen tres mòduls de visió per ordinador independents: un per assistir al "bin-picking", un altre per a la determinació de la posició i orientació de la peça un cop aquesta es troba aïllada en un pla de treball independent i un darrer mòdul per a la verificació del procés de muntatge.

La part del sistema de control d'aquesta estació de muntatge dedicada a la fase de "bin-picking" és bastant versàtil, doncs no entra en discernir quina peça agafa, sinó que es limita en detectar plans assolibles mitjançant l'emissió de llum estructurada i abordar la seva subjecció per buit.

La programació del muntatge es realitza carregant el model en CAD de les peces al segon mòdul, que és qui determina la posició i orientació de les peces i determina com han de ser agafades i quina estratègia s'ha de seguir en el seu muntatge, mentre el tercer mòdul verifica mitjançant visió per ordinador que les operacions es realitzen correctament.

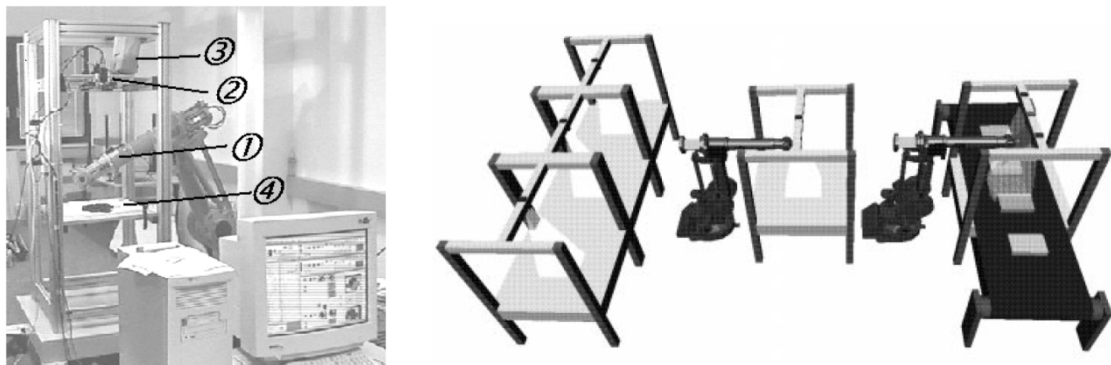


Figura 2.3-1. Fotografia del prototipus físic de Bin-Picking i simulació per ordinador del sistema flexible de muntatge de peces complet desenvolupat per la GUT. Reproducció de [58]

Es tracta, en resum d'un cas clar de programació distribuïda en que els diferents subsistemes treballen en base a una planificació preestablerta.

ii) Estació de Treball Àgil per a aplicacions mecàniques lleugeres –CRWU [60-61]

Els treballs de la *Case Western Reserve University* (CRWU) de 1996^[59], 1997^[60] i 1999^[61] tracten sobre el disseny, la implementació i l'assaig d'una Estació de Treball que inclou diferents sistemes molt interessants com alimentadors flexibles basats en cintes, Robots SCARA i sistemes de visió per computador.

La Figura 2.3-2 reproduïx un sistema d'alimentació basat en un cicle tancat format per tres cintes i una rampa de pendent diferents. Aquest cicle, que comença i acaba en un contenidor és capaç d'agafar peces i separar-les i voltejar-les a mesura que van recorrent les cintes. Al final de la segona cinta, un sistema de visió controla quines peces es troben en posició correcta per a ser agafades per un manipulador extern. Les que no ho estan recirculen per la tercera cinta i cauen de nou al contenidor.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

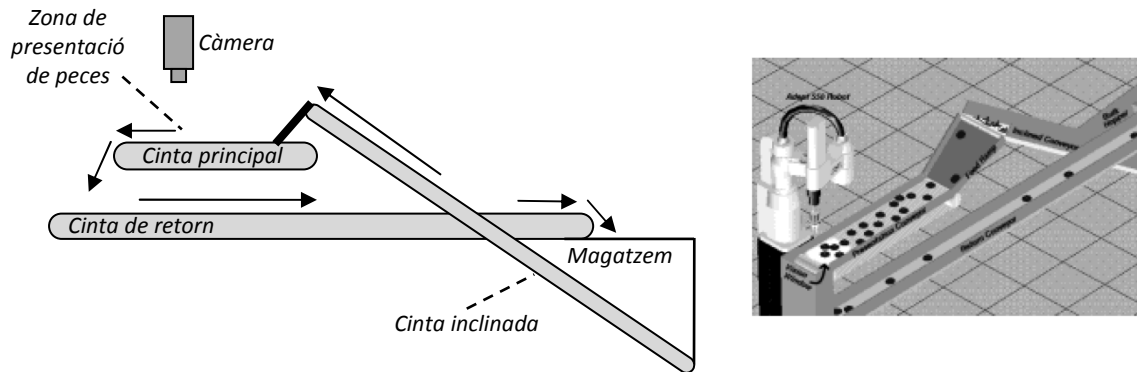


Figura 2.3-2. Distribució en planta i simulació per ordinador del sistema d'alimentació flexible de peces desenvolupat per la CWRU. Reproduccions de l'esquema presentat a [60 i 61]

Aquest esforç per universalitzar l'alimentació té inconvenients reconeguts com ara la impossibilitat de treballar amb peces que rodolin i la probabilitat que el sistema estigui funcionant durant un llarg període de temps sense que cap peça es posi correctament (especialment quan el contenidor es troba quasi buit). No obstant això, el seu funcionament ha quedat demostrat per a determinades aplicacions, tot i que s'allunya una mica del concepte de petit i senzill de fabricació àgil.

Com ja s'ha comentat, els prototipus d'estació de muntatge de la CRWU contenen també Robots SCARA i cintes que treballen amb unitats paletitzades (veure Figura 2.3-3). En aquestes estacions, es preveuen àrees de treball modular i taules d'alimentació on arriben les peces alimentades des de sistemes d'alimentació flexible com el presentat a la Figura 2.3-2; així com espais intermedis on dipositar els palets que circulen per la línia principal.

Aquests espais intermedis s'utilitzen per a rebre els subconjunts que faran de base per al muntatge. En el propi estudi de la CWRU es posa de manifest que un dels problemes afegits d'aquest sistema és el temps perdut en carregar i descarregar el palet ja que cal substituir el palet ple per un de buit.

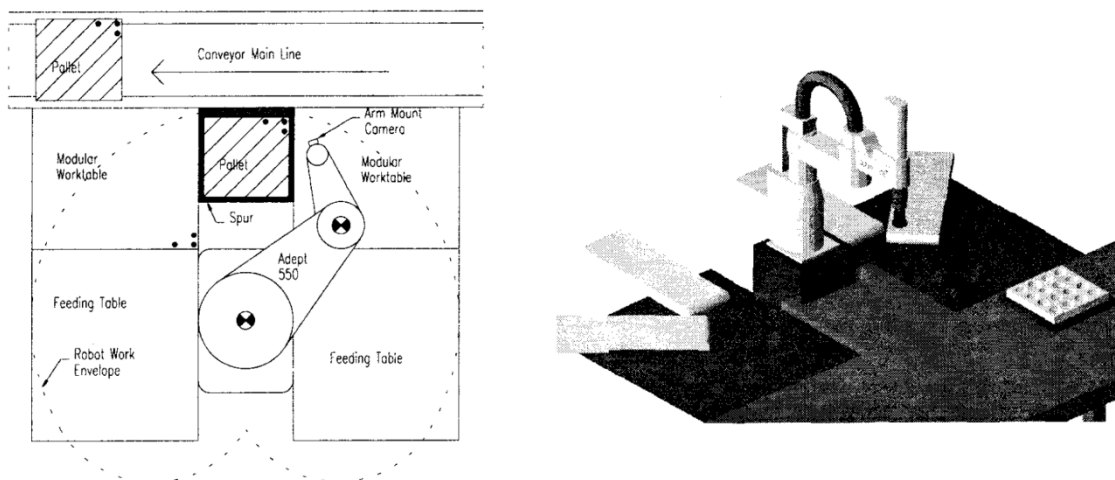


Figura 2.3-3. Distribució en planta i simulació per ordinador de la Cèl·lula de Fabricació flexible per a lleugeres aplicacions mecàniques desenvolupat per la CWRU. Reproducció de [61]

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

La programació i control del sistema global apunta cap a la utilització de metodologies de programació orientades als objectes (agents, subsistemes, entitats amb estats i conducta en general) en contraposició a metodologies orientades a la minifactoria o als productes. Això es deu a que les metodologies orientades a objectes aporten molts aspectes positius. D'entrada, el seu disseny redueix la quantitat d'esforç requerida per introduir nous productes al sistema, a base de reutilitzar el programari. A més, faciliten el manteniment global ja que la implementació dels tipus "classe" pot ser modificada sense que això afecti al codi client.

Newman et al. tracten al 2000^[62] l'existència de dos nivells de treball: el nivell de conducta (alt) i el nivell d'implementació (baix). En aquest sentit, es posa de manifest que el repte real és aconseguir una interfície entre els dos nivells, de forma que el nivell de conducta només s'hagi de preocupar de *què* s'ha de fer per a que el nivell d'implementació es pugui centrar en el *com* s'ha de fer. El rol del nivell alt és doncs limitat i la utilitat "*WorkcellManager*" (que gestiona el nivell alt) és només un element de supervisió i adjudicació de recursos.

iii) Minifactories: Arquitectures per a la Fabricació Àgil – CMU [63-71]

Una altra contribució molt destacable en l'àmbit de les minifactories és deguda al *Microdynamics Systems Laboratory* de l'Institut de Robòtica de la *Carnegie Mellon University* (CMU) a Pittsburg, Pensilvània (2003^[63]). El seu treball combina un sistema distribuït d'agents mecànics i informàtics integrats amb una interfície de treball unificada, que permeten a l'usuari muntar una arquitectura de treball àgil a base d'utilitzar elements modulars.

Els resultats de més de 35 investigadors de la CMU suposen una feina molt complerta tant a nivell de recerca experimental com de desenvolupament físic ^[64, 65, 66, 67, 68], materialitzant la seva recerca aplicada en tota una sèrie de prototips funcionals. Aquests prototips contempnen elements tan diversos com ara: Infraestructura física (Taules, cables, ponts, connectors especials, subministrament d'aire comprimit, electricitat i serveis de xarxa...), Elements de transport intern o "*couriers*", Manipuladors assistits per visió per ordinador, Alimentadors flexibles i Utilitatges intercanviables entre els diferents manipuladors.

Aquest conjunt d'elements modulars permet implementar disposicions molt diverses, com per exemple en sèrie, en 'L', en 'X' o en 'T' segons convingui (veure Figura 2.3-4). La decisió de la solució a implementar ve donada pel procés a realitzar i és proposada per una interfície de treball unificada, que conté una llibreria amb tots els elements possibles a seleccionar. D'aquesta manera, una empresa que necessités muntar una línia de muntatge específica per a un temps limitat, es podria construir una maqueta virtual "*on-line*" i llogar les taules i manipuladors necessaris a una hipotètica empresa fabricant d'arquitectures àgils.

El sistema de control adoptat pel MSL ^[69, 70, 71] és una aposta clara per la programació distribuïda. Aquesta metodologia s'aconsegueix programant el sistema a dos nivells: un nivell alt, que és global i un nivell baix, que és específic per a cada subsistema.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

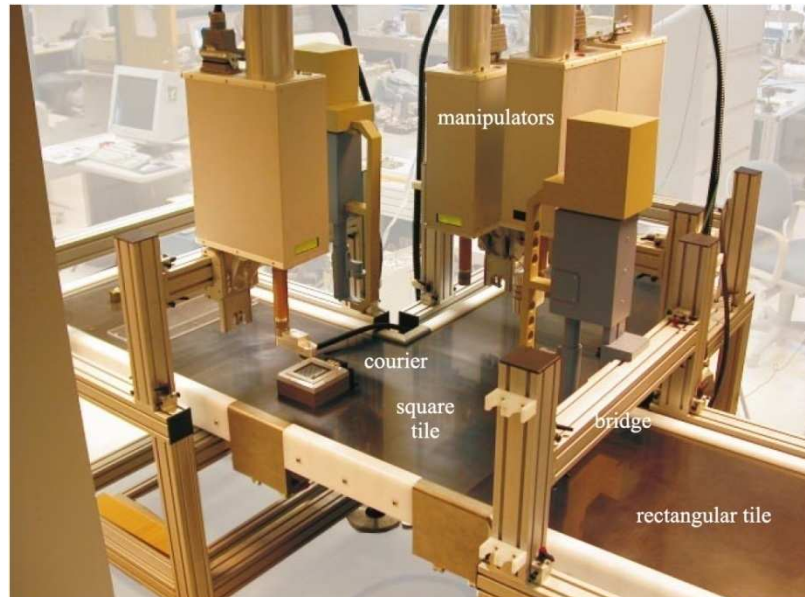


Figura 2.3-4. Imatge d'una configuració en 'T' d'una minifàbrica desenvolupada pel MSL de la CMU. Reproducció de [68]

Segons el propi institut, el nivell alt és *“el responsable de la semàntica operacional de la fàbrica i dels esdeveniments discrets associats”*. Aquest nivell, és doncs, el responsable de la negociació dels recursos, de l'*scheduling* i de les decisions de flux de producte. Tal i com està plantejat, les accions d'aquest nivell no requereixen massa comunicacions entre els agents (subsistemes) i a més no solen estar supeditats a l'operativa en temps real.

En contraposició, existeix un nivell baix continu que és responsable de la seqüenciació i execució de les lleis específiques de control utilitzades en l'entorn de l'agent. El nivell baix és aquell on es reflecteix l'“expertesa” de cadascun dels subsistemes i és qui s'encarrega de les estratègies individuals. A més, aquest nivell té la particularitat de poder actuar sobre els altres subsistemes per a optimitzar processos com ara el transport o el muntatge. És per aquest motiu, que el nivell baix requereix efectuar moltes comunicacions i transferir molta informació entre els diferents subsistemes.

La clau de la programació distribuïda radica en que tot i que no s'accedeix a cap sistema centralitzat ni cap base de dades, cada subsistema “és conscient” de quins seran els elements amb els quals interactuarà. En el cas del MSL, per exemple, els sistemes de manipulació saben que hauran d'agafar les peces dels alimentadors i per tant, hi negociaran per a fer-ho el millor possible.

A la figura següent (veure Figura 2.3-5) es mostra a tall d'exemple un programa de nivell baix pertanyent a un manipulador extret de [70]. En aquest codi queda palès com el manipulador crida a un alimentador, a un *“courier”* i com preveu la transferència de la peça a aquest últim.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

```

#Agent class definition
class Program(ManipProgram):
    #Binding method
    def bind(self):
        #bind a bulk feeder
        self.feeder=self.bindDescription("shaftFeeder")

        #bind product information
        self.product=self.bindPrototype("ShaftB")

    #Execution method
    def run(self):
        while 1:
            #convenience function for getting a product from a feeder
            self.getPartFromFeeder(self.product, self.feeder)

            #wait for a courier for rendez-vous with the manipulator for feeding
            partner=self.acceptRendezvous("Feeding")

            #and transfer to the product to the courier
            self.transferGraspedProduct(partner)

#instantiate the applet
program=Program()

```

Figura 2.3-5. Programa senzill de nivell baix per a un manipulador. Font: [70]

Finalment, cal destacar que el grup de recerca de la CMU integra en el sistema de control, tant els nivells de control distribuïts com les llibreries de selecció d'elements modulars, creant una interfície única de treball amb l'usuari.

- iv) Agents robòtics avançats per a la utilització industrial – Rethink Robotics [72], Shadow Dexterous hand™ [73]

Fent un pas més en la cerca de la destresa pròpia dels humans, algunes empreses estan començant a introduir al mercat agents robòtics capaços d'interactuar amb altres sistemes productius com ara cintes o petites estacions de treball.

Un clar exemple n'és l'empresa Rethink Robotics que després d'una inversió de més de 62 milions de US\$ va posar a la venda l'Octubre de 2012 una arquitectura de "treballador robòtic" a un cost reduït. Aquest operari artificial, anomenat "*Baxter Robot*", està basat en dos braços antropomòrfics (amb càmeres independents i sensors de força integrats) complementat per un sistema d'interacció natural amb una pantalla tàctil i un sistema de reconeixement de veu que facilita l'aprenentatge de tasques.

Si bé el *treballador* necessita ser entrenat, aquest entrenament pot concretar-se simplement en una realització guiada de les operacions (un operari humà pot moure els braços robòtics a fi que el Baxter les repeteixi posteriorment).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

D'altra banda, algunes empreses s'estan focalitzant en explotar la vessant dels terminals, com ara la britànica "*Shadow Robot Company*"^[64]. Després d'un esforç intensiu de recerca en el que va participar en nombrosos projectes Internacionals amb cofinançament de la Comissió Europea, va desenvolupar una mà completament antropomòrfica per a dur a terme manipulació robòtica fina (alguns exemples de demostració es duen a terme amb aliments fràgils com ous o tomàquets).

La *Shadow Robot Hand*TM, és una mà robòtica amb 20 graus de llibertat actuats independentment que incorporen sensors de força i posició. A més també disposa d'uns sensors ultra-sensitius a les puntes dels dits, per tal de desenvolupar taques tal com farien els humans. A més, aquesta mà pot ser utilitzada autònomament o bé incorporar-la a la cadena d'actuació d'altres robots. L'empresa, fundada el 1987, disposa actualment de seus a Londres, Brest i Shangai i ven productes a tot el món.

2.4. Algoritmes d'optimització. Projectes sobre plataformes autònomes d'experimentació

Com a complement de la resposta que poden donar les eines per a fer possible la capacitat d'Intel·ligència Artificial en sistemes productius comentada a l'Apartat 2.2, una quarta vessant important en el present treball correspon als esforços fets en matèria d'optimització de solucions i de plataformes automàtiques d'experimentació, els quals també són ressenyats en els subapartats a continuació.

2.4.1. Optimització de moviments en un espai d'estats: Algoritmes de camí mínim

Assumint que s'ha arribat a construir un graf amb un conjunt d'estats possibles (nodes), i que s'ha quantificat la impedància per viatjar a través d'ells (cost), el problema de trobar la estratègia més favorable per canviar d'estat es converteix en un problema de cerca del camí mínim entre l'estat inicial i l'estat objectiu.

Tal i com apunta la bibliografia tradicional ^[74], una forma de resoldre els problemes de camí mínim és calcular tots els camins possibles entre dos nodes (estats), calcular les impedàncies totals per cadascun dels camins i escollir el camí amb la suma menor. No obstant, fins i tot en els casos de xarxes (grafs) extremadament senzills, la resolució de camins mínims per enumeració és llarga i altament ineficient.

Per aquest motiu, s'han anat desenvolupant variacions a aquesta solució com per exemple la resolució per arbres de camins mínims, els quals emanen del node destí i només consideren els desplaçaments de mínima impedància successivament fins arribar a l'origen.

Si es considera l'exemple reproduït a la Figura 2.4-1., on es tracta de trobar l'arbre de camins mínims per al node "1". Si es vol arribar al node "5", s'haurà de passar necessàriament pel node "4", però per a arribar a aquest es poden escollir dues alternatives: a través del node "2" o del node "3". Donades les impedàncies de cada desplaçament (assenyalades entre parèntesi a la figura), és clar que l'alternativa a través del node "2" és més favorable, doncs suposa una

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

impedància total (5 unitats) inferior al camí que passa pel node "3" (8 unitats). Amb aquest plantejament, l'arbre de camins mínims per al node "1" és el que es presenta a la dreta de la figura.

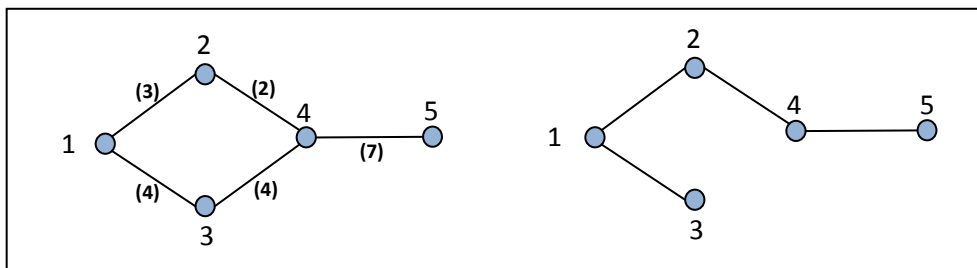


Figura 2.4-1. Exemple de xarxa (esquerra) i Arbre de camins mínims per al node (1) (dreta).
 Font: Reproducció de [74]

La informació d'impedàncies i camins mínims es pot tabular per a donar-hi un tractament informàtic tal i com es presenta a la Taula de la Figura 2.4-2.

Node (j)	Impedància total des del node "j" en el camí cap a "1"	Node precedent a "j" en el camí cap a "1"
1	0	N/A
2	3	1
3	4	1
4	5	2
5	12	4

Figura 2.4-2. Taula de l'arbre de camins mínims per al node 1.
 Font: Elaboració pròpia a partir de [74]

Tot i que casos senzills com el presentat en les figures anteriors poden ser resolts sense necessitat d'un desenvolupament numèric notable, per a casos complexes es solen utilitzar mètodes heurístics especialitzats, com ara[75]: mètodes golafres amb aleatorietat adaptativa ("*greedy randomized adaptive search*"), cerca de variables veïnes ("*variable neighborhood search*"), teories d'optimització de colònies de formigues ("*ant colony optimization*") o algoritmes evolucionables ("*evolutionary algorithms*"). Aquests mètodes heurístics, que originàriament van ser dissenyats per resoldre problemes combinatoris complexes però específics, serveixen actualment per a resoldre problemes d'àmbits generals. D'aquesta manera, s'atribueix a Glover[76] l'establiment el 1986 del terme "*metaheurística*" per definir aquells algoritmes aproximats no expressats específicament per a la resolució d'un problema determinat.

Tal com apunten Blum et al.[77] (2011) les tendències actuals pel que fa a la utilització de metaheurístiques porten cap a la *hibridització* de tècniques; és a dir, cap a l'utilització combinada de mètodes i algoritmes diferents per a la resolució combinada d'un problema concret. Els mateixos autors expliquen aquest gir com una conseqüència de que el focus de la recerca en Operacions hagi anat canviant paulatinament des d'un enfocament basat en algoritmes cap a un enfocament basat en la solució de problemes. Aquest abordatge híbrid ha generat grans sinèrgies i "*fertilització creuada*" entre tècniques diferents que han

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

desencadenat multitud d'algoritmes híbrids molt potents capaços de resoldre problemes molt complexos: seleccionant una combinació adequada d'algoritmes complementaris es poden donar resposta a problemes d'optimització amb uns resultats excel·lents.

2.4.2. Plataformes autònomes d'experimentació per al descobriment de Models de Conducta

Els ordinadors, tal com s'ha comentat en els apartats anteriors, són bons per a dur a terme tasques repetitives i proporcionen gran poder de computació i una millor repetibilitat del que serien capaços els humans. Per aquest motiu, els ordinadors són els millors candidats a aprendre i a realitzar experiments de manera autònoma i la seva capacitat de formalitzar nous coneixements tot just es troba en els prolegòmens.

Un assoliment molt interessant en aquest camp va ser el culminat l'any 2009 pels investigadors Lopson i Schmidt del "*Creative Machines Lab*"^[78] de la "*Cornell University*" de Nova York (EUA) que van desenvolupar una interfície d'experimentació anomenada "*Eureka Machine*" dedicada a modelitzar matemàticament les lleis de la natura observant el comportament del món front a experiments.

En concret, es tracta d'un aplicatiu que pren dades de sistemes físics (com per exemple un mecanisme de doble pèndol o altres sistemes senzills) i realitza una etapa de modelatge numèric per determinar les equacions bàsiques que governen la física del moviment^[79]. No cal dir que la repercussió del sistema a la comunitat científica va ser majúscula, ja que significava que els ordinadors i les màquines prenen el lloc als científics que durant mil·lenis han estat explicant el comportament de l'Univers. Els detalls de la màquina van ser ampliament disseminats en journals i també en mitjans de comunicació més socials; tot fixant una fita important: la primera troballa d'un descobriment científic per part d'un ens robòtic.

Més enllà dels resultats inicials, aquest programari consistent en una plataforma d'experimentació automàtica per a la modelització de lleis físiques va ser desenvolupat en els anys posteriors a la investigació com a producte informàtic (anomenat "*Eureka Desktop*") i en actualment fins i tot pot ser comprada a través d'Internet.

L'abast potencial de l'aplicació d'aquests sistemes és molt gran, ja que podrien ser utilitzats en àmbits tant variats com la medicina, la biologia, la cosmologia, les ciències ambientals o fins i tot les ciències socials. No cal dir, doncs, que el moment de salt disruptiu en el que es troba l'estat de l'art actualment és majúscul. Es tracta de saber fins a quin punt els científics canviaran el seu rol en els anys futurs, tot intercanviant-se amb els equips automàtics: els científics es dedicaran a introduir informació i a tasques de manteniment mentre que l'experimentació i la inferència de nous coneixements quedaran encomanades a les màquines.

Capítol 3. Exploració de Sistemes Binaris segons l'algoritme de Gomà i Vivancos

3.1 Construcció de models del món teòrics a partir d'experiments (Gomà i Vivancos^[3])

Tal com van exposar Gomà i Vivancos^[3] l'any 1999, un sistema de control automàtic permet als robots realitzar pràcticament qualsevol procés (suposant que tingui suficients sensors, velocitat, graus de llibertat, etc.), però requereix una programació exhaustiva on el programador hagi tingut en compte qualsevol eventualitat possible en el transcurs de la realització.

En aquest context, es va considerar si podria ser possible construir un sistema de control que, un cop hagués realitzat una etapa prèvia d'experiments, fos capaç d'entendre el comportament del món en el qual es troba (entenen *món* com el conjunt format per l'entorn i per ell mateix) per tal de tenir èxit al realitzar una tasca determinada; no programant tots els passos per assolir-la explícitament, sinó a partir de presentar al sistema l'estat final desitjat.

Aquest *Model del Món* es construeix a partir d'una teoria lògica que incorpora el coneixement derivat dels resultats obtinguts fruit de la realització d'experiments. Es fa la hipòtesis que el món està poblat per objectes, els quals tenen una llista finita d'estats possibles. La seva relació amb l'entorn es realitza a partir de Sensors (*Entrades 'E_i'*) i Accionaments (*Sortides 'A_i'*), materialitzats per funcions de percepció ($\{E\}=\{E_1, E_2, \dots, E_n\}$) i funcions de canvi d'estat ($\{EO_{(t=t+1)}\}=\{f(X_t)\}$). La modelització, doncs, està basada en una suposició plenament determinista del món, on per cada instant de temps existeix una teoria complerta que determina l'estat de tots els objectes del món en l'instant de temps següent.

En aquestes modelitzacions, els objectes es classifiquen en quatre classes diferents; depenent de la complexitat que comporti la explicació de la seva evolució temporal:

- i) *Objectes de Primera Classe*: Aquells els quals el seu estat a l'instant ' $t+1$ ' depèn únicament dels valors presos pels accionaments a l'instant ' t '. $\{EO_{i(t=t+1)}=f(A_t)\}$
- ii) *Objectes de Segona Classe*: Aquells els quals el seu estat a l'instant ' $t+1$ ' depèn de l'estat en que es troben a l'instant ' t ' i dels valors presos pels accionaments a l'instant ' t '. $\{EO_{i(t=t+1)}=f(EO_{i(t)}, A_t)\}$
- iii) *Objectes de Tercera Classe*: Aquells els quals el seu estat a l'instant ' $t+1$ ' depèn de l'estat en que es troben una sèrie d'altres objectes diferents de sí mateix a l'instant ' t ' i dels valors presos pels accionaments a l'instant ' t '. $\{EO_{i(t=t+1)}=f(\epsilon O_{(t)}, A_t)\}$
- iv) *Objectes de Quarta Classe*: Aquells els quals el seu estat a l'instant ' $t+1$ ' depèn de l'estat en que es troben ells mateixos i una sèrie d'altres objectes a l'instant ' t ' i dels valors presos pels accionaments a l'instant ' t '. $\{EO_{i(t=t+1)}=f(EO_{i(t)}, \epsilon O_{(t)}, A_t)\}$

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Donat que el model és complet i finit, el sistema pot aprendre les lleis que governen el seu món a base de realitzar tots els experiments possibles combinant les diferents funcions de canvi d'estat en els diferents estats, utilitzant la seva percepció de l'entorn i adoptant el coneixement derivat del seu canvi en cadascun dels casos possibles.

L'algoritme de Gomà i Vivancos consisteix en un procediment d'experimentació seqüencial orientat a trobar una explicació per a cada canvi d'estat. Bàsicament es tracta de realitzar conjunts d'experiments dels quals es van obtenint relacions causa-efecte entre estats inicials i finals i els valors presos per $EO_{i(t)}$, $\epsilon O_{(t)}$ i A_t .

Primer s'analitzen les relacions dels canvis d'estat per a tots els objectes i s'intenta establir una relació unívoca que sigui només funció dels valors presos pels accionaments. Dit d'altra manera, es tracta de veure per a quins objectes $EO_{i(t=t+1)}=f(A_t)$. Aquells objectes en que això sigui cert, es fixen com a objectes de primera Classe i s'integren al coneixement del sistema les funcions de canvi d'estat pertinents. Després, per als objectes els quals el seu comportament no ha pogut ser explicat de manera unívoca d'aquesta manera, l'experimentació segueix seguint les normes dels objectes de tercera Classe, segona Classe i finalment de quarta Classe.

3.2 Programació de l'algoritme de Gomà i Vivancos^[3] en sistemes binaris

Com a primera aproximació per abordar l'exploració i estudi d'algoritmes de construcció de models del món s'ha implementat l'algoritme proposat per Gomà i Vivancos exposat a "*Construction by a robot of a logical theory of itself and its environment through experiments*" simulant diversos sistemes automàtics a partir de la definició dels seus accionaments i sensors i de les seves ubicacions dins d'un espai d'estats determinat.

En aquesta primera implementació, s'han construït diversos sistemes automàtics senzills a partir d'elements *Accionaments* i *Sensors* força habituals en Cèl·lules de Fabricació Flexible. En concret, es tracta dels Accionaments *agafador*, *atruent*, *entrant*, *posicionador*, *transportador*, *sortint* i de Sensors de *posició* o *d'estat*. En la modelització de cadascun d'aquests elements, donat que es vol estudiar el desenvolupament de l'algoritme en sistemes binaris, s'imposa que només puguin prendre dos valors de funcionament: '0' o '1'.

A mode de suport, per tal de poder estudiar el comportament de la resposta dels sistemes automàtics es van implementar petites subrutines en un programa en forma de *Macro* que es desenvolupaven sobre fulls de càlcul del programari *Microsoft® Excel®* (Veure Annex 1). En aquesta programació, es va partir d'unes premisses, les quals es mantenen constants al llarg de tot el programa, i que són les següents:

- i) Els resultats dels sensors i els possibles valors dels accionaments són sempre valors binaris i, per tant, es treballa amb àlgebra lògica o de *Boole*.
- ii) El temps es quantifica de manera discreta a unitats tals que van des d'un instant de règim permanent al següent.

A partir dels elements bàsics esmentats, l'objectiu de la realització va ser trobar els principis de funcionament de l'evolució d'aquests sistemes com a resultat dels valors retornats pels sensors a partir dels valors dels accionaments, tant en l'instant actual com en el previ; i dels valors dels sensors en els instants anteriors, segons fos pertinent.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

3.2.1 Especificacions: Tipus d'accionaments, tipus de sensors i nomenclatura

Per tal d'implementar els algorismes de construcció de *Models del Món* en exemples concrets que poguessin provenir de l'entorn industrial i donada la gran varietat de topologies de subsistemes continguts en les Cèl·lules de Fabricació Flexible de processos productius existents, es va optar per restringir el gran nombre de tipus d'accionaments diferents a només sis tipus genèrics d'accionaments per especificar els sistemes a experimentar.

Aquests tipus d'accionaments contemplats $\{A_i\}$ són els que es descriuen amb detall a continuació:

- i) **Posicionador:** Tipus d'accionament que fa variar la posició dels elements que tingui a continuació. En el cas discret, l'accionament podria ser un pistó de simple o doble efecte capaç de posicionar una peça en qualsevol de les seves dues posicions extremes. La seva representació gràfica es mostra a Figura 3.2-2.

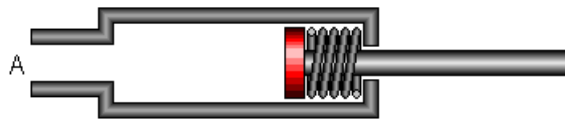


Figura 3.2-1. Representació gràfica d'un pistó posicionador

- ii) **Agafador:** Tipus d'accionament que recull una peça si es troba en el lloc adequat en el moment que és activat i no la deixa anar fins que l'accionament es desactiva. Un exemple real d'aquest tipus d'accionament podria ser la pinça d'un robot industrial.

En general, és bo que aquest tipus d'accionament porti un sensor de peça incorporat, de manera que es pugui distingir clarament si el dispositiu està activat amb peça o sense. La representació gràfica d'un accionament agafador és la que es mostra a Figura 3.2-3, on S1 és un sensor al plat inferior i S2 un sensor de peça incorporat a la pinça.



Figura 3.2-2. Representació gràfica d'un element agafador

- iii) **Atraient:** Tipus d'accionament capaç de moure una peça per atracció (dins d'uns límits de cobertura) en el moment que és activat i que no la deixa anar fins la seva desactivació. De fet, és un element similar a l'*accionament agafador*, però en aquest cas la peça pot trobar-se en un rang de posicions més ampli. Un exemple industrial real d'aquesta materialització podria ser un electroimant o bé una ventosa de succió.

Un sensor incorporat a l'accionament serà necessari només quan la peça potencialment atreta pugui abandonar l'àrea d'influència de l'accionament. Aquí la

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

posició on es trobi la peça no és important ja que la peça serà atreta des del lloc on es trobi. La representació gràfica d'un accionament atraient és la que es mostra a la Figura 3.2-4, on S1 és un sensor en un plat o espai superior i S2 un sensor incorporat a l'electroimant.

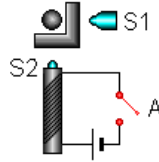


Figura 3.2-3. Representació gràfica d'un element atraient (imant)

- iv) **Entrant:** Tipus d'accionament que en ser activat causa l'entrada d'una peça al sistema estudiat. Un exemple real d'aquesta materialització podria ser un dispensador rotatiu de peces.

El sensor col·locat a la rebuda de peces està vinculat directament amb aquest tipus d'accionament. Com altres accionaments d'aquest estil, no té sensor directament vinculat a la seva activitat, sinó que utilitza els de posició. En cas que no tingui elements posicionadors al darrere, només hi haurà un sensor de posició vinculat a ell. Una possible representació gràfica per a l'accionament entrant és la que es mostra a la Figura 3.2-5.



Figura 3.2-4. Representació gràfica d'un element entrant

- v) **Transportador:** Tipus d'accionament que en ser activat provoca que una peça que es trobi en una determinada ubicació es traslladi d'acord amb el temps d'activació que hagi sofert. En la realitat, aquest tipus de transportador podria representar una cinta transportadora de banda o de cadenes.

Aquest tipus d'accionament ha d'estar vinculat (com a mínim) a dos sensors de diferents punts de la línia de la màquina. Com altres accionaments d'aquest estil, no té sensor directament vinculat a la seva activitat, sinó que utilitza els de posició. En cas que no tingui elements posicionadors al darrere, només hi haurà dos sensors de posició vinculats a ell, l'origen i el destí. El sensor d'origen s'implementarà com un accionament sortint, mentre que el de destí s'implementarà com un d'entrant. La seva representació gràfica és la que es mostra a la Figura 3.2-6.



Figura 3.2-5. Representació gràfica d'un element transportador (cinta)

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

- vi) **Sortint:** Tipus d'accionament complementari a l'element entrant, que en ser activat provoca la sortida d'una peça del sistema. Un exemple d'aquest tipus d'element pot ser un evacuador de peces del sistema.

Similar a l'entrant, condiona el sensor col·locat al final de la línia. Com altres accionaments d'aquest estil, no té sensor directament vinculat a la seva activitat, sinó que utilitza els de posició. En cas que no tingui elements posicionadors al darrere, només hi haurà un sensor de posició vinculat a ell.

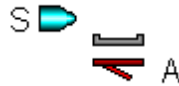


Figura 3.2-6. Representació gràfica d'un element sortint

A més, es preveu que aquests tipus d'accionaments (dels quals es poden veure algunes imatges de possibles materialitzacions físiques reals per a algun d'ells a la Figura 3.2-7) es puguin posar en funcionament de dues maneres diferents, que són:

- a) **Mode Interruptor:** Cada estat de l'accionament està directament vinculat a un estat del dispositiu que representa. Un exemple d'element que funciona amb aquest tipus de mode de funcionament és el pistó, que només pot ocupar una posició mínima o una posició màxima corresponent a l'especificació '0' o '1' comentada a l'apartat anterior. Efectivament, si s'envia una senyal de valor '1', el pistó es desplegarà fins al màxim de la seva longitud, i no es replegarà fins que no es torni a variar el seu estat per prendre valor igual a '0'. Fent el símil, es pot dir que la consigna queda marcada com en un interruptor.
- b) **Mode Polsador:** Mode de funcionament mitjançant una actuació en forma de pols de l'accionament. En aquest tipus de consigna, l'estat del sistema real canvia en activar-la, donat que desencadena algun succés en particular. Un exemple d'element que pot funcionar amb aquest tipus de mode de funcionament és l'element entrant (per exemple, dispensador rotatiu de peces), en el que una consigna d'actuació provoca l'entrada d'una peça al sistema. En aquests casos, però, la senyal (discreta) torna a ser '0' i la consigna s'atura mentre no s'hi faci arribar alguna altra consigna d'actuació.



Figura 3.2-7. D'esquerra a dreta, imatges de diferents tipus d'accionaments Agafador (pinces), Posicionador (pistó) i Transportador (cinta de banda). Font: Fundació CIM

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

De la mateixa manera que en el cas anterior, per tal de simplificar els sistemes a analitzar, en el present treball s'han considerat únicament dos tipus de senyals de sensors diferents $\{S\}$ que són les que es recullen a continuació:

- a) **Sensors de peça:** Mostren si una peça es troba en un lloc de la línia de la màquina. Acostumen a servir com a posició de repòs entre l'activitat dels accionaments. Un exemple d'un sensor de peça pot ser una balança, que pot controlar el pes d'una peça en tot moment.
- b) **De seguretat:** Són sensors que indiquen l'estat d'un accionament. Serveixen per confirmar que l'estat d'un accionament correspon amb la senyal de consigna que se li ha donat. Un exemple de sensor de seguretat podria ser un amperímetre.

3.2.2. Consideracions sobre la modelització dels diferents elements (accionaments i sensors)

Per tal de garantir el correcte funcionament dels sistemes, s'ha considerat que en les diferents operacions realitzades, no tots els accionaments s'activen a la vegada, sinó que existeix un determinat ordre d'activació entre ells. En general, s'ha pres com a criteri que els primers accionaments en posar-se en funcionament són els accionaments més propers a l'inici de la línia de la màquina. Aquest fet és especialment rellevant en el cas d'accionaments posicionadors, que se suposa que s'activen sempre pel mateix punt de la línia.

En aquestes implementacions, en parlar dels sensors de posició, sempre es pressuposa que un sensor de posició controla una dimensió en l'espai i que la relació entre el sensor i l'accionament posicionador vinculat a ell manté una relació directa; és a dir, que si $A_i=0 \rightarrow S_i=0$ i que si $A_i=1 \rightarrow S_i=1$. En cas que la relació sigui contrària, s'hauria d'invertir la lògica del sensor (cal recordar que és tant en el seu instant actual com en el previ). Un exemple d'aquest fet és el braç de doble pistó.

Les primeres implementacions especificades funcionen bé per a sistemes d'accionaments aïllats, només amb posicionadors previs. Per a sistemes d'elements en línia s'ha de tenir en compte el fet que l'accionament posterior pugui treure peces de la seva posició, com el cas de la cinta i el manipulador.

3.3 Experimentació i resultats de la utilització dels algoritmes

La utilització de l'algoritme de Gomà i Vivancos s'ha dut a terme en quatre casos d'aplicació que es recullen a continuació. Es tracta de sistemes senzills formats per combinacions dels accionaments i sensors descrits a l'apartat anterior i que podrien tractar-se d'arquitectures automàtiques de fabricació programables per ordinador.

L'objectiu en cadascun dels casos serà realitzar el procediment descrit a l'algoritme per tal de trobar els diferents objectes de les Classes 1^a, 3^a, 2^a i 4^a presents en cada cas, juntament amb les diferents funcions de canvi d'estat pertinents. El procediment seguit per a la identificació dels objectes i de la determinació de la seva Classe és el que va ser presentat per Gomà i

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Vivancos, si bé per a fer més senzill el procés (en alguns casos són necessaris un gran nombre d'experiments), s'ha utilitzat l'ajut d'una petita aplicació construïda expressament amb petites Macros sobre el programari *Microsoft® Excel®*, tal com es ressenya a l'Annex 1.

3.3.1. Definició dels Casos d'Aplicació

- Cas 1: Pistó i electroimant

El primer cas d'experimentació implementat consisteix en el cas de l'exemple contingut en la pròpia explicació de la metodologia de l'algorisme a l'article de Gomà i Vivancos. En essència es tracta d'un mecanisme senzill format per un pistó neumàtic (amb una molla recuperadora) que desplaça un dispositiu d'electroimant en el seu extrem (Veure Figura 3.3-1).

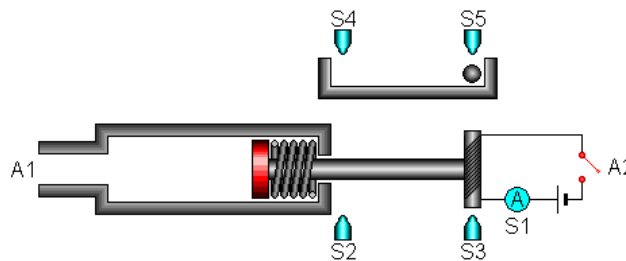


Figura 3.3-1. Primer cas d'experimentació "Pistó i electroimant"

El funcionament del mecanisme és senzill, contenint dos Accionaments que són el propi pistó 'A₁' (accionament del tipus posicionador) i l'electroimant 'A₂' (accionament de tipus atraient), els quals són modelitzats com un element posicionador i un atraient respectivament. D'altra banda, es disposa de 5 sensors, dels quals el primer és un Amperímetre ('S₁') i quatre sensors de posició ('S₂', 'S₃', 'S₄' i 'S₅') que retornen la posició respecte a l'eix horitzontal dels elements peça (bola) i electroimant.

Se suposa que l'interruptor és el darrer en actuar. L'especificació del seu valor '0' o '1' és la que recull la taula de la Figura 3.3-2.

Variables	0	1
A1: Pistó	Plegat	Estès
A2: Interruptor	Obert	Tancat
S1: Amperímetre	No corrent	Corrent
S2: Imant 1	No esquerra	Esquerra
S3: Imant 2	No dreta	Dreta
S4: Bola 1	No esquerra.	Esquerra
S5: Bola 2	No dreta	Dreta

Figura 3.3-2. Taula d'especificació del cas d'experimentació "Pistó i electroimant"

D'aquesta manera, es pretén validar els resultats obtinguts amb el que proposava l'autor a l'article per així corroborar que el funcionament de la teoria lògica està d'acord amb els resultats esperats.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

- Cas 2: Braç de doble pistó

La segona arquitectura en la que s'ha realitzat una prova d'aplicació es tracta d'un sistema format per dos pistons en sèrie (amb molla de retorn), el segon dels quals incorpora una pinça (accionament de tipus agafador) al seu extrem (Veure Figura 3.3-3).

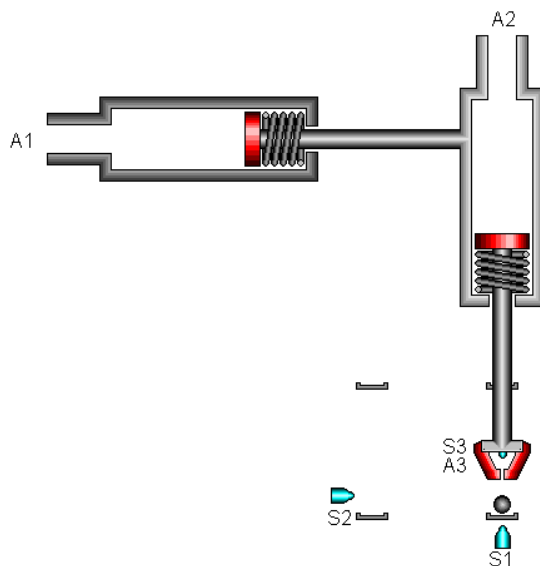


Figura 3.3-3. Segon cas d'experimentació "Braç de doble Pistó"

En aquest segon cas es tenen tres accionaments, dos d'ells corresponents als dos pistons ('A₁' i 'A₂') que són modelitzats mitjançant elements posicionadors i un tercer accionament corresponent a la pinça situada a l'extrem del segon pistó que es modelitza segons un element agafador ('A₃'). Pel que fa als sensors, en el cas inicial se n'ha situat dos en els plats de les posicions inferiors ('S₁' i 'S₂') que donen informació relativa a la posició de la peça (bola) en alguna de les dues línies d'ubicació (vertical dreta per a 'S₁' o inferior horitzontal per a 'S₂'). Se suposa que la pinça actua la última i que sempre hi ha una única peça al sistema.

D'altra banda, a continuació se n'ha realitzat un altre model de simulació tot introduint un tercer sensor 'S₃' a la punta de la pinça situada a l'extrem del segon pistó. Els detalls de la seva especificació segons valors de '0' i '1' és la que es pot trobar a la taula de la Figura 3.3-4 a continuació.

VAR.	0	1
A1: Braç 1	Plegat	Estès
A2: Braç 2	Plegat	Estès
A3: Pinça	Oberta	Tancada
S1: Posició Horitzontal	Esquerra	Dreta
S2: Posició vertical	Amunt	Avall
S3: Pinça	Peça	No Peça

Figura 3.3-4. Taula d'especificació del cas d'experimentació "Braç de doble Pistó"

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

- Cas 3: Manipulador i cinta

En el tercer cas d'aplicació s'han introduït nous elements com ara una cinta (accionament de tipus transportador) que funciona en mode polsador i un element evacuator (accionament de tipus sortint) que funciona en mode interruptor (Veure Figura 3.3-5).

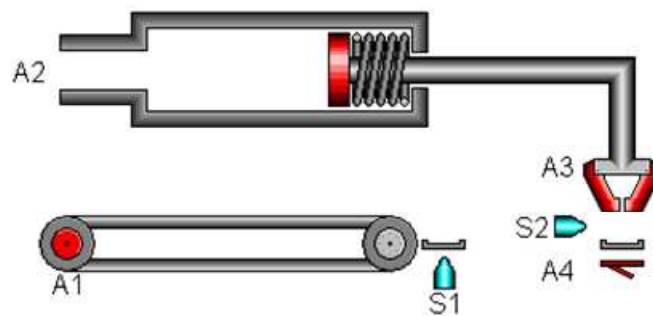


Figura 3.3-5. Tercer cas d'experimentació: "Manipulador i cinta"

D'aquesta manera, es tenen quatre accionaments que corresponen a la Cinta ('A₁'), al pistó amb molla de retorn ('A₂'), a la pinça situada a l'extrem del pistó ('A₃') i a l'accionament evacuator ('A₄'). En aquest tercer cas d'aplicació es tenen també dos sensors, corresponents als sensors de posició en els dos plats ('S₁' i 'S₂').

Se suposa que en activar la cinta, aquesta sempre du una peça nova i que la cinta actua la primera i la peça la última. L'especificació corresponent és la que recull la taula de la Figura 3.3-6 a continuació.

VARIABLES	0	1
A1: Cinta	Aturada	En marxa
A2: Pistó	Plegat	Estès
A3: Pinça	Oberta	Tancada
A4: Comporta	Tancada	Oberta
S1: Peça cinta	Buïda	Plena
S2: Balança	Buïda	Plena

Figura 3.3-6. Taula d'especificació del cas d'experimentació: "Manipulador i cinta"

- Cas 4: Rotatori triple

Finalment, com a darrer cas d'experimentació es modelitza un sistema d'alimentació format per tres dipòsits de peces situats a 120° sobre un eix de revolució accionat elèctricament. D'aquesta manera, s'introdueix un element rotatori que funciona en mode polsador i que es modelitza mitjançant un accionament de tipus entrant (Veure Figura 3.3-7).

Així doncs, es tenen tres accionaments que són el mencionat eix de rotació primari ('A₁') corresponent a un accionament de tipus entrant, l'eix d'activació de l'evacuador dels dipòsits de peces ('A₂') modelitzat segons un accionament transportador i finalment un tercer

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

evacuador de peces ('A₃') modelitzat per un accionament sortint. Complementàriament, es tenen dos sensors col·locats al nivell dels dipòsits ('S₁') i sobre el plat ('S₂').

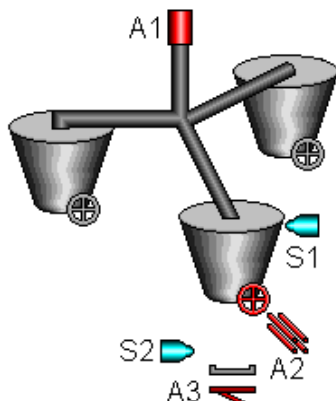


Figura 3.3-7. Quart cas d'experimentació: "Element Rotatori triple"

En aquest cas es suposa que l'accionament 'A₁' (eix de rotació primari) és posat en marxa en tipus polsador, que els dipòsits nous sempre arriben plens, que l'accionament 'A₂' integra comporta i pinça i que les comportes actuen més tard que l'eix de rotació primari. La seva especificació és la que recull la taula de la Figura 3.3-8 a continuació.

VARIABLES	0	1
A1: Rotador primari	Quiet	Gira
A2: Evacuador de Dipòsits	Tancat	Obert
A3: Evacuador de Plat	Tancada	Oberta
S1: Indicador de Nivell	Buit	Ple
S2: Plat	Buit	Ple

Figura 3.3-8. Taula d'especificació del cas d'experimentació: "Manipulador i cinta"

3.3.2. Resultats experimentals

- Cas 1: Pistó i electroimant

L'experimentació comença amb la identificació dels Objectes de les Classes 1^a i 3^a. Per a fer-ho cal suposar l'existència d'un objecte per a cada variable de sortida, és a dir dos objectes 'O₁' i 'O₂', doncs es tenen dues consignes de sortida cap als accionaments: 'A₁' i 'A₂'.

Amb això, es realitza un experiment per a cada estat actual ('S'), conjunt de variables de sortida ('A') i estat de procedència ('EO_{t-1}'). En aquest cas es té que cal realitzar un experiment per a cada valor d'aquests 3 conjunts d'estats ('S', 'A' i 'EO_{t-1}') que poden prendre amb N=2 valors possibles (ja que es tracta de sistemes binaris) i per tant, $N^{(2+2+2)}=2^6=64$ experiments necessaris.

Per tal de comprovar si un objecte és de 1^a Classe, caldrà comprovar que l'entrada (resposta rebuda pels Sensors 'S') només depèn únicament del valor pres per les sortides (valors presos

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

pels accionaments 'A'), sense importar el valor que prenien aquesta variable en l'estat actual o previ.

A nivell matemàtic, això suposa que el nombre de vegades que apareix el valor de les variables de sortida ha de ser igual al de la unió d'aquest mateix valor i el de la variable d'entrada a avaluar, el qual es compleix per a dos objectes ('O₁' i 'O₂'), que depenen de les senyals dels accionaments 'A₁' i 'A₂' respectivament. Per a aquests (tal com es mostra a la Figura 3.3-9), es té que un primer objecte 'O₁' està caracteritzat pels sensors 'S₂' i 'S₃', que passen de valdre '1' a '0' i '0' a '1' respectivament quan l'estat de l'accionament 'A₁' passa de '0' a '1'.

1 ^a CLASSE						
O1	A1	S1	S2	S3	S4	S5
0	0	-	1	0	-	-
1	1	-	0	1	-	-
O2	A2	S1	S2	S3	S4	S5
0	0	0	-	-	-	-
1	1	1	-	-	-	-

Figura 3.3-9. Resultats experimentals dels elements de primera classe trobats en el primer cas d'experimentació (pistó i electroimant)

D'altra banda, per tal de comprovar si un objecte és de 3^a Classe, cal assegurar que una entrada (resposta rebuda pels detectors 'S') només depèn únicament de l'estat actual i del valor de les sortides (valors de consigna dels accionaments 'A').

A nivell matemàtic, això suposa que el nombre de vegades que apareix el valor dels estats en l'instant actual i de les variables de sortida ha de ser igual al de la unió d'aquest mateix valor i el de la variable d'entrada a avaluar. A diferència de l'anterior, en realitzar els experiments, no es troben objectes de tercera classe.

A continuació es tracta de detectar i identificar objectes de classes posteriors (2^a i 4^a Classe), per als quals cal suposar un objecte per a cada variable d'entrada no vinculada a cap objecte ja trobat. Per a fer-ho es realitza un experiment per a cada conjunt de variables de sortida ('A') i estat de procedència ('EO_{t-1}') de tots els objectes (identificats i suposats); per tant, en l'exemple es tracta de realitzar 1 experiment per a cada valor de 2 conjunts, (1 conjunt de 'EO_{t-1}' = 3 estats i 1 altre conjunt amb A=2 estats), amb N=2 valors possibles que fan un total de $N^{(3+2)} = 2^{(3+2)} = 2^5 = 32$ experiments.

La condició per a ser objectes de 2^a Classe respon a comprovar que el seu valor només depèn del valor pres per ell mateix a l'instant previ i a les variables de sortida (accionaments), el qual matemàticament, suposa que el nombre de vegades que apareix el valor de l'estat a avaluar a l'instant previ i el de les variables de sortida ha de ser igual al de la unió d'aquest mateix valor i el de l'estat a avaluar a l'instant actual.

En realitzar els experiments, es troba un objecte de 2^a Classe ('O₃'), que determina l'estat de les entrades E4 i E5, tal com mostra la Taula 3.3-10.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

2ª CLASSE		
O3	S4	S5
0	1	0
1	0	1

Figura 3.3-10. Taula de resultats experimentals dels elements de 2ª Classe trobats en el primer cas d'experimentació (pistó i electroimant)

Els objectes no identificats fins al moment són de 4ª Classe i estan vinculats a cadascuna de les variables d'entrada no vinculades prèviament. En aquest cas, però, totes les variables d'entrada han estat vinculades i per tant no existeixen objectes de 4ª Classe.

Fent abstracció del que s'ha trobat en aquesta etapa d'experimentació, en aquest cas particular es pot donar nom als objectes que poblen el Món. En concret, s'ha trobat un Objecte de Primera Classe ('O₁') que varia amb la senyal d'entrada que proporcionen els sensors 'S₂' i 'S₃'. Aquest Objecte és la posició de l'Electroimant. D'altra banda, s'ha identificat un altre Objecte de Primera Classe ('O₂') que varia amb la senyal d'entrada que proporciona el sensor 'S₁', corresponent a l'Amperímetre del circuit. Aquest Objecte es correspon amb l'electroimant. Finalment, s'ha identificat un tercer Objecte de 2ª Classe dependent de la Senyal dels Sensors 'S₄' i 'S₅'. Aquest darrer objecte és la posició de la peça (bola) al llarg del plat superior.

- Cas 2: Braç de doble pistó

i) Cas sense sensor a la punta de la pinça

Es suposen tres objectes per a les tres variables de sortida ('A₁', 'A₂' i 'A₃'). Es tenen dos sensors que donen lloc a dues variables d'entrada ('S₁' i 'S₂'). Després de realitzar tots els jocs d'experiments (512) i no trobar cap objecte de primera o tercera classe, l'anàlisi posterior (32 experiments) revela l'existència d'un objecte de segona classe i un altre de quarta, tal com es mostra a la taula de la Figura 3.3-11.

2ª CLASSE	
O1	S1
0	0
1	1
4ª CLASSE	
O2	S2
0	0
1	1

Figura 3.3-11. Taula de resultats experimentals dels elements de 2ª i 4ª classe trobats en el segon cas d'experimentació (braç de doble pistó), sense sensor a la punta de la pinça

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

L'abstracció dels resultats trobats en aquest cas fa que es pugui anomenar 'O₁' a la presència d'una peça (bola) a la línia vertical dreta i l'Objecte 'O₂' a la presència d'una peça (bola) a la línia horitzontal inferior. En aquests supòsits existeix un cas d'indefinió, corresponent a saber si la peça (bola) es troba al plat de la posició superior esquerra o bé a les pinces del manipulador.

ii) Cas amb sensor a la punta de la pinça

Igual que en la casuística anterior, es suposen tres objectes per a les tres variables de sortida ('A₁', 'A₂' i 'A₃'). Ara, però, es tenen fins a tres sensors que donen lloc a tres variables d'entrada ('S₁', 'S₂' i 'S₃'). Després de no trobar cap objecte de Primera ni de Tercera Classe realitzant tots els experiments necessaris (512), es realitza la segona ronda d'experimentació (64 experiments) on no es troba cap Objecte de Segona classe, però sí tres Objectes de 4^a Classe (Veure Figura 3.3-12).

4 ^a CLASSE	
O1	S1
0	0
1	1
O2	S2
0	0
1	1
O3	S3
0	0
1	1

Figura 3.3-12. Taula de resultats experimentals dels elements de 4^a classe trobats en el segon cas d'experimentació (braç de doble pistó), amb sensor a la punta de la pinça

En aquesta variant del Cas de doble pistó, l'abstracció dels resultats trobats en aquest cas fa anomenar 'O₁' a la presència de la peça (bola) a la línia vertical dreta i l'Objecte 'O₂' a la presència de la peça (bola) a la línia horitzontal inferior i l'Objecte 'O₃' a la presència de la peça (bola) a les pinces del manipulador. En aquest cas, no es dona la indefinió anterior i la posició de la peça (bola) pot ser determinada en tot moment.

- Cas 3: Manipulador i cinta

Es suposen quatre objectes per a les quatre variables de sortida ('A₁', 'A₂', 'A₃' i 'A₄') i dos sensors que donen lloc a dues variables d'entrada ('S₁' i 'S₂'). Després de no trobar cap objecte de Primera o Tercera classe en la ronda inicial d'experimentació (121 experiments), l'anàlisi en la segona ronda (50 experiments) revela l'existència dels dos Objectes de 4^a Classe recollits a la taula de la Figura 3.3-13.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

4 ^a CLASSE	
O1	S1
0	0
1	1
O2	S2
0	0
1	1

Figura 3.3-13. Taula de resultats experimentals dels elements de quarta classe trobats en el tercer cas d'experimentació (Manipulador i cinta)

Un cop més l'abstracció porta a posar noms als objectes trobats. L'Objecte 'O₁' seria una peça (bola) ocupant la posició del plat esquerra. D'altra banda, l'Objecte 'O₂' seria una peça (bola) ocupant la posició del plat dret.

- **Cas 4: Rotatori triple**

Inicialment es suposen tres objectes per a les tres variables de sortida ('A₁', 'A₂' i 'A₃') i dos sensors que donen lloc a dues variables d'entrada ('S₁' i 'S₂'). Després de no trobar cap objecte de primera o tercera classe en la primera experimentació amb 330 experiments, l'anàlisi posterior de 32 experiments revela l'existència de dos Objectes, un de 2^a Classe i un altre de 4^a Classe recollits a la taula de la Figura 3.3-14 a continuació.

2 ^a CLASSE	
O1	S1
0	0
1	1
4 ^a CLASSE	
O2	S2
0	0
1	1

Figura 3.3-14. Taula de resultats experimentals dels elements de 2^a i 4^a classe trobats en el quart cas d'experimentació (Rotatori triple)

Finalment doncs, l'abstracció a la realitat porta a posar noms als objectes trobats. L'Objecte 'O₁' té com a significat un dipòsit ple i l'Objecte 'O₂' és una peça (en la figura una bola) ocupant la posició del plat inferior.

3.3.3. Reflexions i Corol·laris sobre l'algoritme de Gomà i Vivancos

L'exploració del món segons l'algoritme de Gomà i Vivancos parteix d'una exploració exhaustiva de totes les accions possibles (consignes dels accionaments) i de la observació de les senyals que marquen els sensors en cadascuna d'aquestes.

A mesura que es detecten patrons de canvi capaços de lligar com a causa-efecte les senyals de determinats accionaments i el canvi de valor de determinats sensors, es va formalitzant l'existència d'objectes als que s'associa un patró de comportament conegut (són els anomenats objectes de primera classe). A partir d'aquí, es realitzen noves exploracions on l'estat dels objectes també pot ser una variable causal i es detecten els objectes de segona, tercera i quarta classe.

L'algoritme de Gomà i Vivancos és doncs una aproximació que requereix una forta experimentació inicial (experimentació exhaustiva) i de successives etapes posteriors per als objectes de diferent classe per tal d'arribar a un model del món. En aquest sentit, existeix un gran camp per a la introducció de millores corresponents a dur a terme exploracions no exhaustives ja sigui perquè es lligui l'aprenentatge a la consecució d'objectius o bé, perquè s'introdueixi la possibilitat d'utilitzar prejudicis o abstracció del model a altres supòsits no experimentats.

En qualsevol cas, tenint en compte l'algoritme tal i com el van formular els seus creadors, es poden enunciar els següents corol·laris:

- **Corol·lari 1: No tots els objectes del món estan necessàriament controlats pel propi sistema**

En l'univers format pel sistema i el seu entorn poden haver-hi objectes que escapin del control del sistema; és a dir, que estiguin governats per accionaments diferents dels del propi sistema o bé que estiguin condicionats pels estats d'objectes de fora del sistema. En cas que això succeeixi, es poden donar casos d'indefinició en el model del món generat per l'algoritme de Gomà i Vivancos que hauran de tractar-se a base d'introduir nous objectes que s'anomenaran "*objectes ocults*" i nous accionaments que s'anomenaran "*accionaments no controlats*". Aquests nous objectes i accionaments s'hauran d'introduir de la manera habitual dins l'algoritme per tal de generar un model del món prou complet per tal d'explicar totes les combinacions d'entrades i sortides del sistema.

- **Corol·lari 2: El nombre d'objectes del món no queda acotat pel nombre de sensors del sistema**

Donat un món format pel sistema i el seu entorn, el nombre d'objectes que conté es determina a base de descobrir una relació causa-efecte entre senyals d'accionaments i senyals de sensors. Per tant, en el cas general binari, seria d'esperar que un món no pogués estar habitat per un nombre més alt d'objectes que de sensors. Però lligat al Corol·lari anterior, el fet de poder introduir objectes ocults mitjançant la utilització d'accionaments no controlats pel sistema implica que aquests nous accionaments podran tenir efectes que no es poden captar

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

pels sensors del sistema; sinó que caldrien nous sensors per poder-los conèixer. Per tant, donat que en el món hi poden haver més respostes que les captades pels sensors del propi sistema, també hi pot haver més objectes que els determinats pel nombre de sensors d'aquest.

- Corol·lari 3: El model del món no sempre és únic

El procediment utilitzat per l'algoritme per formalitzar un model del món no garanteix que aquest model sigui únic. De fet, es demostra que en els casos en que un objecte té més de dos estats possibles, el model del món es pot formalitzar amb un objecte binari més per a cada estat a partir del tercer, sense que es perdi informació en la modelització. Depenent dels objectes que l'habiten, pot ser que un mateix món es pugui modelitzar amb models diferents, tots ells vàlids.

- Corol·lari 4: L'acompliment d'objectius és un desplaçament dins de diferents espais d'estats

A un sistema que coneix el món en el que es troba, se li pot demanar com a objectiu que aconsegueixi un determinat estat per a un, diversos o tots els seus objectes. Fent aquest supòsit i tenint en compte la modelització realitzada, assolir l'objectiu consisteix en fer que cada objecte es desplaci pel seu graf des de l'estat inicial fins al final desitjat. Per part del sistema, l'acompliment dels objectius només serà possible si el desplaçament no necessita que canviïn d'estat cap dels accionaments no controlats (i si l'estat d'aquests no canvia fortuïtament). Altrament, el sistema només assolirà l'estat final desitjat per causes que no depenen d'ell exclusivament.

Capítol 4. Exploració d'algoritmes en sistemes binaris

4.1. Definició de l'entorn de treball, restriccions i objectius del sistema

Per tal d'explorar nous algoritmes de construcció de models del món es defineix un primer entorn de treball basat en els moviments d'un capçal d'una hipotètica màquina-eina de dos eixos controlats sobre un taulell 2D. Les possibles posicions del capçal sobre el taulell són discretes i es corresponen amb una retícula quadrada de ' $N \times M$ ' espais (Veure Figura 4.1-1).

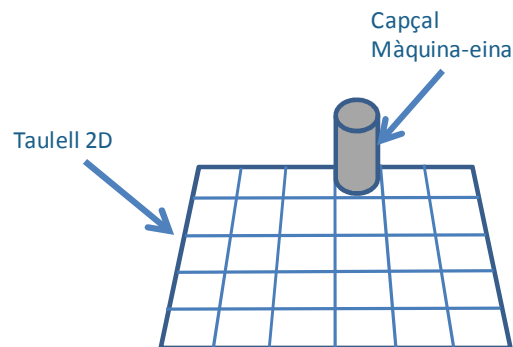


Figura 4.1-1. Situació de partida: Capçal de Màquina-eina que es pot moure pels diferents espais d'un Taulell 2D (a la imatge, de 6x5 espais).

Les variables corresponents als sensors i accionaments del sistema només poden prendre valors binaris (0 o 1). Pel que fa als sensors, n'hi ha un a cada posició del taulell i té com a funció indicar si dita posició està lliure (0) o bé ocupada pel capçal o un altre obstacle (1). D'altra banda, existeixen només dos accionaments (moviment segons l'eix d'abscisses o d'ordenades) de manera que el capçal es pot moure una posició en ' x ' o ' y ' a cada cop de rellotge si les variables corresponents als seus accionaments prenen per valor 1 o bé restar immòbil si dites variables prenen per valor 0 (Veure Figures 4.1-2 i 4.1-3).

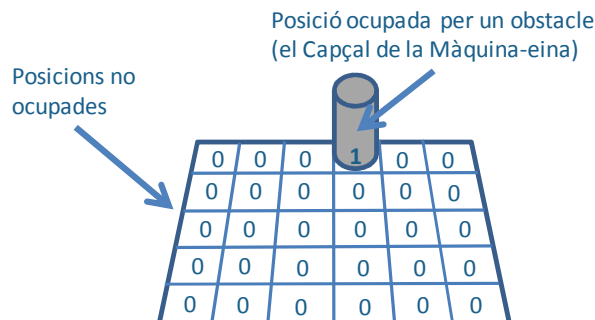


Figura 4.1-2. Lectures dels sensors disposats a cadascuna de les posicions ('0' lliure, '1' ocupat).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

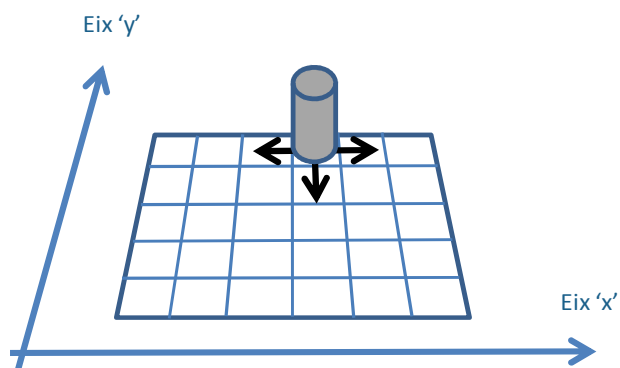


Figura 4.1-3. Moviments possibles del capçal des d'una posició en el Taulell 2D.

L'objectiu que es planteja per al sistema és el següent: l'usuari defineix una posició inicial del capçal (la qual implica un estat inicial del món: $\{E_0\}$) i una posició final del capçal (la qual implica un estat final del món: $\{E_f\}$) i a partir d'aquestes el sistema ha de ser capaç de conduir-lo sense més ajut de l'usuari (Veure Figura 4.1-4).

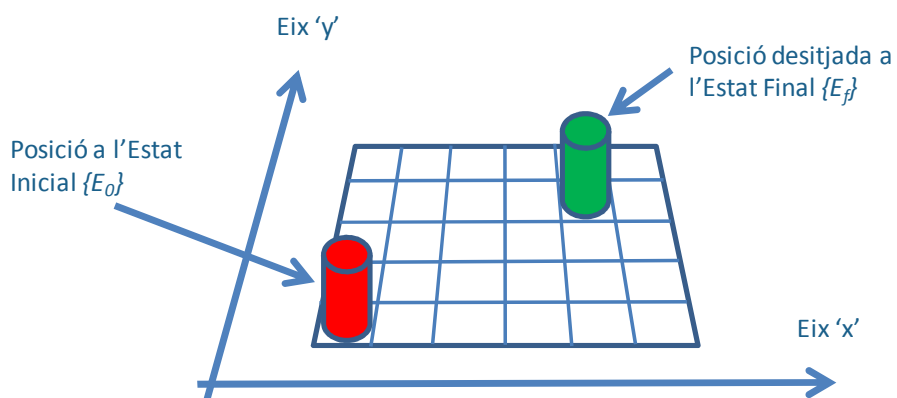


Figura 4.1-4. Posicions del Capçal de la Màquina-eina als Estats Inicial $\{E_0\}$ –Capçal pintat en vermell- i Final $\{E_f\}$ –Capçal pintat en verd-.

Per a fer-ho, donat que el sistema no coneix els estats assolibles ni les regles que governen el món, el propi sistema haurà de realitzar exploracions a través d'experiments. Els resultats d'aquests experiments li proporcionaran una base d'informació per a formalitzar un primer model del món. Serà doncs en base a aquest model, que el sistema dissenyarà l'estratègia necessària per poder desplaçar el capçal des de la seva posició inicial fins a la final desitjada.

Tenint en compte els resultats del treball de Gomà i Vivancos i dels casos d'estudi implementats al capítol anterior, fent els experiments per a la situació plantejada a la Figura 4.1-4, s'arribaria a la conclusió que el món està poblat per un objecte (el capçal) que va prenent estats diferents dins una llista finita d'estats possibles (en concret podria prendre fins a 30 estats, corresponents a les 30 posicions assolibles en la retícula dibuixada de 6x5). D'altra banda, fent servir el corol·lari 3 presentat a l'apartat 3.3.3., també es podria modelitzar com un món compost per 30 objectes binaris, que van prenent per valor 0 o 1 en funció de si l'element capçal es troba en correspondència amb ells.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Malgrat aquests llindars màxims, és bastant probable que per assolir l'estat final del món $\{E_f\}$ a partir d'un estat inicial $\{E_0\}$ no sigui necessari transitar per tots els estats possibles com a estats intermedis. Dit d'altra manera, en alguns casos, el sistema podrà resoldre tasques encomanades (ententent tasca encomanada com arribar a un estat final partint d'un estat inicial) sense haver de conèixer tots els estats possibles, tal com es mostra a la Figura 4-1.5.

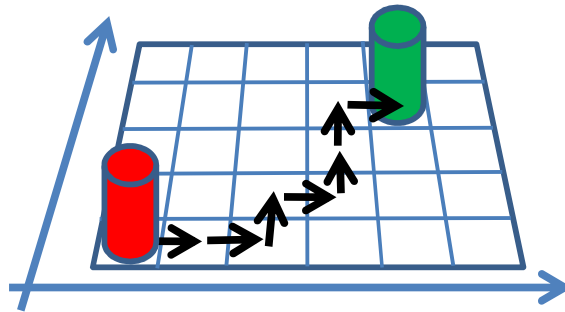


Figura 4.1-5. Possible estratègia de resolució de l'assoliment d'un Estat Final $\{E_f\}$ –Capçal pintat en verd- a partir d'un Estat Inicial $\{E_0\}$ –Capçal pintat en vermell-.

Finalment, les regles que governen el món podran canviar i anar fent-se més complicades:

- Món sense obstacles (situació presentada a les Figures 4.1-1 a 4.1-5)
- Món amb obstacles inamovibles
- Món amb obstacles que es poden empènyer

4.2. Construcció de Models del Món i assoliment d'estats

Segons el que s'ha apuntat a l'apartat anterior, l'abordatge de l'exploració d'algoritmes en sistemes binaris es realitzarà mitjançant la implementació de dues grans etapes diferenciades: l'etapa d'Exploració del món i l'etapa d'Execució de tasques.

L'etapa d'Exploració del món consistirà en realitzar experiments per tal d'assolir estats diferents de l'inicial (que anomenem $\{E_0\}$). En aquests experiments s'activaran consignes ($\{\alpha\}$) corresponents a les accions possibles en el món dissenyat. Com a cas inicial i amb l'objectiu de simplificar les operacions a estudiar, només es contemplaran els moviments d'avanç sobre el pla 'x'-y'; és a dir, només es consideraran tres possibles consignes: $\{\alpha_1\}=\{0,0\}$, $\{\alpha_2\}=\{1,0\}$ i $\{\alpha_3\}=\{0,1\}$ tot assimilant les possibles accions a dos accionaments en les dues direccions cartesianes del pla i de sentit creixent.

A mesura que es van aplicant consignes $\{\alpha_i\}$ al món, l'estat del món pot anar canviant, tot assolint nous estats diferents (que són anomenats $\{E_i\}$). Tal com ja s'ha comentat a l'apartat anterior, en el cas d'una retícula 2D de dimensions 5x6, es podrien arribar a assolir fins a 30 estats diferents (l'inicial i 29 de nous). Al vector d'estats assolits se l'anomenarà $\{\xi\}=\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$, i cal notar que no té perquè estar format per tots els estats possibles sinó per un subconjunt que dependrà de la realització de l'exploració empresa.

Finalment, per a cada canvi d'estat, el sistema podrà guardar la informació de quina ha estat l'acció $\{\alpha_i\}$ que ha dut a terme per passar de ξ_i a ξ_{i+1} , configurant així una taula de canvis d'estat; o dit d'altra manera, el conjunt de funcions de canvi d'estat. Per motius de simplicitat,

Programa de Doctorat d’Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

se suposarà que el sistema té repetibilitat total i que per tant, donat un estat inicial i una consigna determinats, l’estat següent obtingut sempre serà el mateix.

La Figura 4.2-1 mostra la resposta percebuda per cadascuna de les posicions de la retícula 2D implementada. Com que el capçal és l’únic element que es troba a la superfície, l’espai que ocupa també és l’única senyal que perceben els sensors (que retornen un ‘1’). En aplicar una consigna $\{\alpha_2\}=\{1,0\}$ a l’estat anomenat $\{E_1\}$, el sistema arriba a un altre estat anomenat $\{E_2\}$.

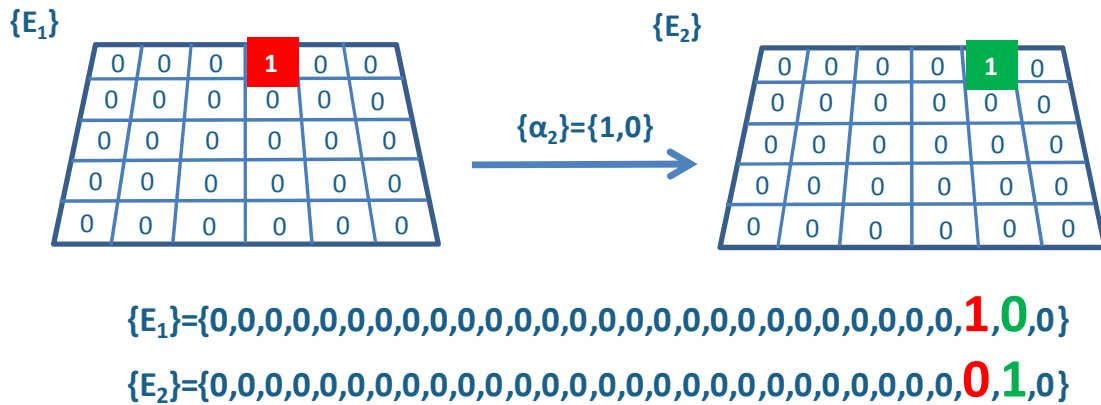


Figura 4.2-1. $\{E_1\}$ i $\{E_2\}$ conseqüència d’aplicar una senyal $\{\alpha_2\}=\{1,0\}$.

Fent doncs una evolució de l’Algoritme de Gomà i Vivancos, i tenint en compte que en el món només es considerarà un sol objecte (el capçal), el model del món (Ω) per a l’exploració de sistemes binaris haurà de contenir quatre ítems; dos d’ells inherents a la definició del model:

- Llista de consignes disponibles per enviar als accionaments: $\{\alpha\}=\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$
- Llista de sensors actius proporcionant informació: $\{S\}=\{S_1, S_2, \dots, S_{30}\}$

I dos més contenint la informació obtinguda directament de l’experimentació:

- Llista d’Estats possibles assolits: $\{\xi\}=\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i\}$, on $i \leq 30$ en el cas $N \times M=5 \times 6$
- Llista de Funcions de Canvi d’Estat: $\{F\}=\{f_1, f_2, \dots, f_k\}$, on $k \leq 90$ en el cas $N \times M=5 \times 6$

La materialització de l’etapa d’*Exploració del món* es pot dur a terme de dues maneres diferents: d’una banda, es pot fer una “*Exploració lliure*” (on es pot limitar el nombre màxim d’accions o be interrompre-la si s’aconsegueix l’assoliment de tots els estats possibles) i d’altra banda es pot desitjar una “*Exploració per objectius*” (on també es podrà limitar el nombre màxim d’accions o bé aturar-la si s’arriba a l’objectiu fixat).

L’*Exploració lliure* consisteix en realitzar accions que no s’han realitzat prèviament per anar descobrint el contingut de la Llista de Funcions de Canvi d’Estat. Aquest tipus d’exploració sol estar enfocat a determinar de forma exhaustiva les conseqüències de cada acció $\{\alpha_i\}$ empresa en cadascun dels estats que es vagin coneixent.

L’*exploració per objectius* consisteix en definir un estat inicial $\{E_0\}$, i un estat final $\{E_f\}$ i anar realitzant accions de manera seqüencial fins arribar a un nou estat $\{\xi_i\}=\{E_f\}$. En aquest cas, doncs, l’objectiu és arribar a $\{E_f\}$, el qual suposa que no es cercarà ser *exhaustiu* sinó *efectiu*.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Un cop es dona per completada l'etapa d'*Exploració del món*, el sistema està llest per procedir a l'etapa d'*Execució de tasques*. En aquesta nova etapa, el sistema pren com a informació de partida $\{\alpha\}$, $\{S\}$, $\{\xi\}$, i $\{F\}$; i se li encomana arribar des d'un estat inicial $\{E_{02}\}$ fins a un estat final $\{E_{f2}\}$ tals que $\{E_{02}\}, \{E_{f2}\} \in \{\xi\}$.

La resolució de l'etapa d'*Execució de tasques* es pot dur a terme de manera senzilla en el cas que s'hagi obtingut un model del món exhaustiu, a través de la utilització d'un algoritme de camí mínim. En efecte, el model del món es pot tractar com un graf on cada *Estat Assolible* $\{\xi_i\}$ és un node, situat a una distància concreta del següent: arribar d'un estat inicial $\{E_{02}\}$ fins a un estat final $\{E_{f2}\}$ consistirà en trobar un camí practicable de distància mínima que els uneixi.

Altrament, en el cas que l'etapa d'exploració del món no hagi estat exhaustiva, donada la premissa que $\{E_{02}\}, \{E_{f2}\} \in \{\xi\}$, el sistema sempre podrà trobar una ruta viable fins a l'estat final: ' $\sigma_{2,1}$ ', que es construirà a partir d'una seqüència d'accions $\{\alpha_{\sigma_{1,1}}\}$ i consistirà en una ruta a través de diferents estats (o nodes) del graf: $\{\xi_{\sigma_{1,1}}\}$. Ara bé: És aquesta ruta la més curta (òptima, de cost mínim $C_{\sigma_{1,1}}=C_{02-f2}^*$) entre $\{E_{02}\}$ i $\{E_{f2}\}$? Amb les dades que el sistema té, es pot ampliar el contingut del Model del Món per trobar una ruta millor?

Per tal que això sigui possible, els algoritmes per a la construcció de models del món hauran d'incorporar la implementació de prejudicis i d'abstracció de regles, inferint relacions causa-efecte a partir d'observacions de casos similars. La introducció de noves regles pot donar lloc a l'obtenció de noves solucions ' $\sigma_{2,i}$ ' amb un cost ' $C_{\sigma_{2,i}}$ ' inferior al cost ' $C_{\sigma_{2,1}}$ ' que s'obté resolent el problema fent servir únicament els Estats $\{\xi\}$ i les Funcions de Canvi d'Estat $\{F\}$ descobertes en l'etapa d'*Exploració del món*.

Abans d'incorporar les noves regles al model del món (en definitiva nous Estats $\{\xi\}$ i Funcions de Canvi d'Estat $\{F\}$), el sistema haurà d'executar cada nova solució trobada ($\sigma_{2,i}$) per corroborar que efectivament s'arriba a l'estat final desitjat $\{E_{f2}\}$. En cas que l'estat final no sigui correcte, el sistema descartarà les noves regles i prendrà com a bona la solució basada en $\sigma_{2,1}$. En el cas que les regles inferides per a una nova solució ($\sigma_{2,i}$) es compleixin satisfactòriament, s'incorporaran totes les $\{\xi\}$ i $\{F\}$ al model del món (que ara serà Ω_2), tot estenent el nombre d'estats possibles i incloent noves Funcions de Canvi d'Estat.

Les funcions utilitzades per calcular el cost d'una determinada solució ' $C_{\sigma_{i,j}}$ ' també són programables de manera que es puguin realitzar diferents valoracions. La primera funció implementada (més senzilla) calcula el cost d'una solució simplement sumant el nombre de desplaçaments en 'x' i 'y' i assignant-los a cadascun d'ells un cost idèntic i igual a la unitat. Amb aquest càlcul, les solucions de cost seran millors si impliquen menys desplaçaments en el pla "x-y".

Tot i això, en algunes topologies de màquina, podria ser que en la realitat fos més costós moure un eix que un altre (per exemple si un dels dos eixos mòbils va muntat sobre l'altre es requerirà una despesa energètica major) i per tant podria tenir interès assignar costos diferents als desplaçaments segons els diferents eixos mòbils. D'acord amb la programació utilitzada, la funció de càlcul de cost està implementada de manera independent al cos de l'algoritme i pot recollir les característiques que siguin necessàries en cada cas.

Amb tot, el procés de Construcció de Models del Món i la seqüència de treball per a l'assoliment d'estats es sintetitza en la Figura 4.2-2.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

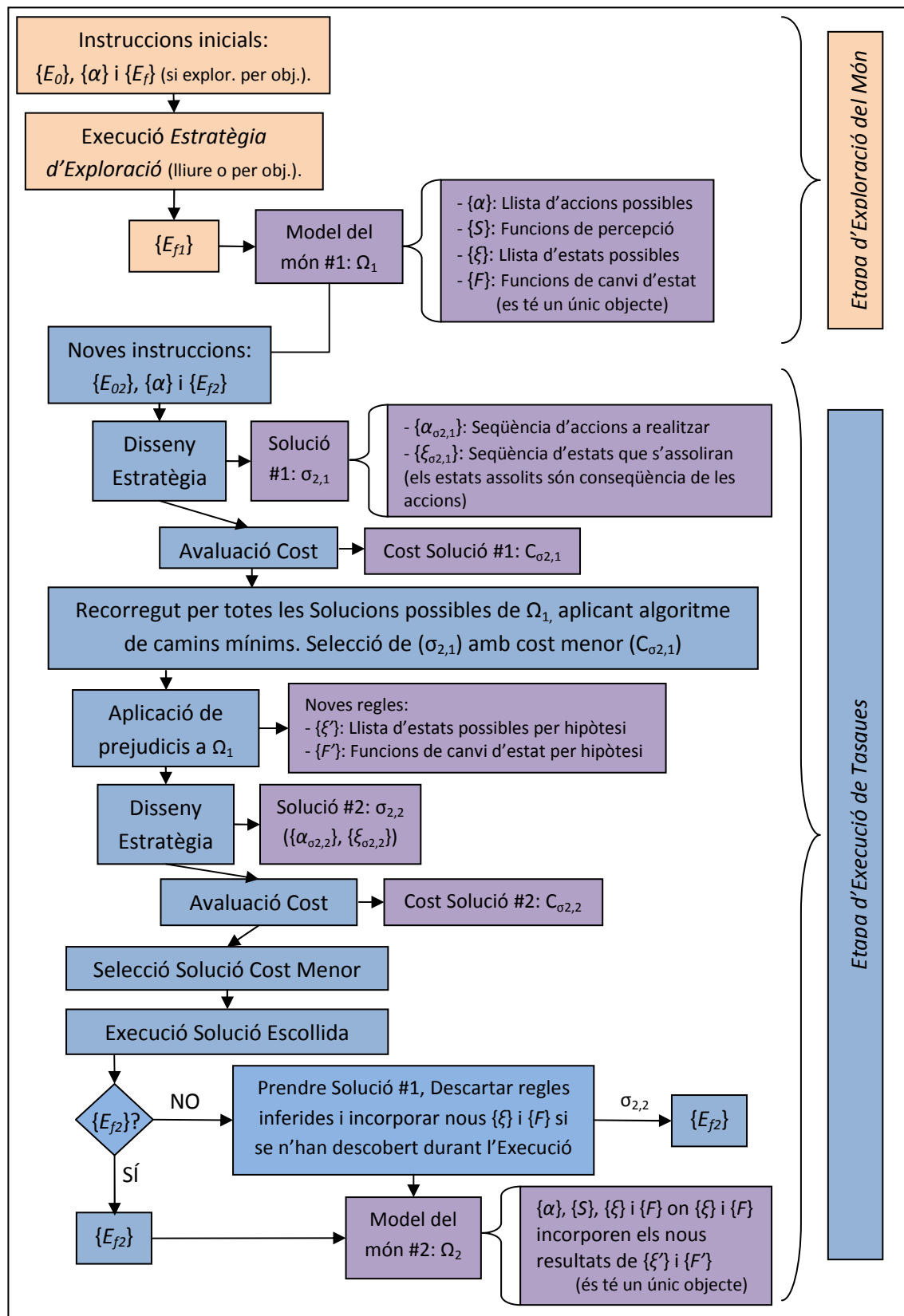


Figura 4.2-2. Procés de Construcció de Models del Món i la seqüència de treball per a l'assoliment d'estats.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

4.3. Implementació segons *Visual Studio*®

Per procedir a l'experimentació d'aplicació d'algoritmes per a la Construcció de Models del Món, s'ha materialitzat un programa a mida mitjançant el Programari *Microsoft*® *Visual Studio*® 2008. Dins aquest programa, que s'ha anomenat "*Espai d'Estats*", s'hi ha implementat l'algoritme sencer, comprnent tant l'etapa d'*Exploració del Món* com la d'*Execució de Tasques*.

Microsoft® *Visual Studio*® és una plataforma molt reconeguda de desenvolupament de programari dissenyada per al desenvolupament d'aplicacions Windows® i d'aplicacions Web que inclou diversos llenguatges de programació molt comuns entre la comunitat desenvolupadora de programari -entre ells Visual Basic, C# i C ++-, i que està específicament preparada per ajudar a l'usuari en les tasques de disseny i programació. A més, la plataforma també conté el *.NET Framework*® que són llibreries de funcions integrades que contenen tota la funcionalitat del sistema operatiu *Microsoft*® *Windows*®. D'altra banda, el *Microsoft*® *Visual Studio*® disposa d'un entorn gràfic de desenvolupament anomenat "*Entorn Integrat de Desenvolupament*" (en anglès: IDE - *Integrated Development Environment*), que assisteix al programador agilitzant la implementació de controls en pantalla de forma gràfica i evitant el codi en el moment de disseny de la interfície.

El programa "*Espai d'Estats*" està dissenyat de manera que el nombre d'espais possibles a la retícula pugui prendre virtualment qualsevol valor –a la Figura 4.3-1 es presenta la modelització d'una situació amb una retícula 8x8-, però la interfície permet seleccionar els valors de retícula 'N'x'M' que desitgi l'usuari.

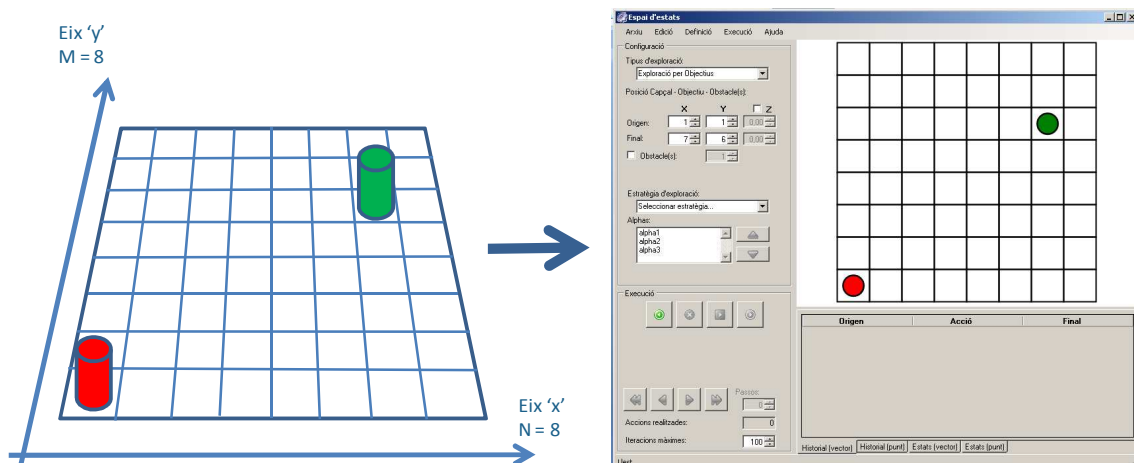


Figura 4.3-1. Programació de la situació abordada mitjançant *Microsoft*® *Visual Studio*® amb la interfície programada a mida anomenada "*Espai d'estats*".

Malgrat això, en el text de la present Tesi Doctoral, s'ha tingut en compte que des d'un punt de vista algorítmic, moltes de les situacions i models del món (Ω) a estudiar són fàcils d'analitzar descriptivament quan el nombre de Sensors $\{S\}$, Accionaments $\{\alpha\}$, Estats possibles assolits $\{\xi\}$ i Funcions de Canvis d'estat conegudes $\{F\}$ es mantenen en nombres relativament reduïts. En particular, els dos darrers ($\{\xi\}$ i $\{F\}$) estan intrínsecament lligats amb paràmetres com ara el nombre d'espais disponibles a la retícula ('N'x'M') o el nombre d'obstacles en el món. Per aquest motiu, en els exemples presentats i estudiats en el present treball, s'utilitzen valors de

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

retícula 'N'x'M' relativament baixos. En el món físic real, el pas a un major nombre d'espais –i d'obstacles- a la retícula, representa un augment de la resolució dels motors que posicionen els diferents eixos 'x' i 'y' de la Màquina-Eina estudiada.

Per tal d'assajar l'algoritme proposat, el primer que caldrà fer serà definir amb detall quin és l'escenari sobre el que es volen fer els experiments. Per a això, en primer lloc s'ha de definir la *Configuració* que es vol assajar i de quina manera es durà a terme l'*Execució* de les diferents accions. Dit d'altra manera, cal parametritzar l'etapa d'*Exploració del Món* per aconseguir que el sistema sigui capaç de formalitzar un primer *Model del Món* (Ω_1). Un cop fet això, el programari serà capaç de realitzar les accions (de manera automàtica o bé per indicació de l'usuari) i mostrar en temps real el resultat obtingut per les accions realitzades en cada cop de rellotge en forma gràfica (dins la finestra 2D "Món") i també de forma numèrica (dins la finestra d'"Història del Món").

La Figura 4.3-2 mostra l'aparença de la interfície "Espai d'estats" per a l'etapa d'*Exploració del Món*, on destaquen les quatre finestres principals esmentades (*Configuració*, *Execució*, *Món* i *Historial*).

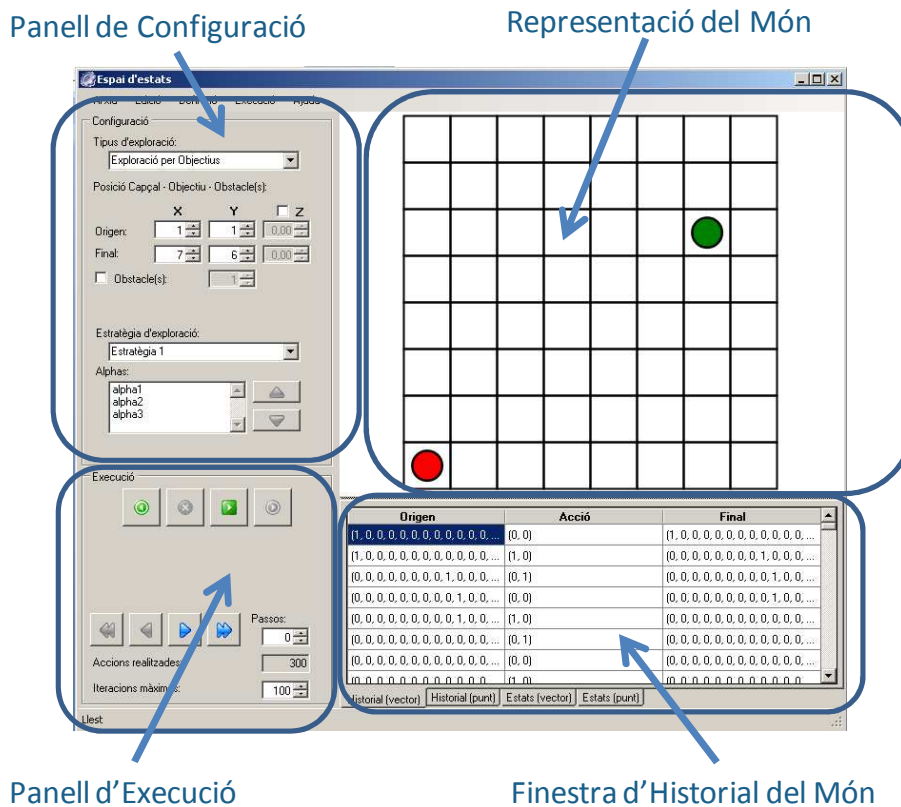


Figura 4.3-2. Aparència de la interfície "Espai d'Estats" amb les quatre finestres principals

Tenint en compte que l'objectiu de l'espai d'estats és construir un model del món, el primer que cal escollir –al Panell de Configuració- és quin tipus d'exploració es durà a terme; o dit d'altra manera, de quina manera es realitzaran els experiments per formar la base d'informació inicial sobre la qual construir el model del món. En el programa implementat, es pot escollir entre tres tipus d'exploracions:

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

- *Exploració per Usuari:* L'usuari pot moure el capçal pel taulell i pot anar comprovant com el món i l'historial va variant amb cada moviment.
- *Exploració Lliure:* L'ordinador pot explorar el món lliurement fins que arriba a un nombre màxim d'accions definit per l'usuari.
- *Exploració per Objectius:* L'ordinador pot explorar el món lliurement fins que arriba a l'objectiu (estat final) definit o bé fins que consumeix el nombre màxim d'accions definides per l'usuari.

En qualsevol dels tres casos, al final de la simulació, el programa tracta la informació obtinguda per formalitzar un model del món (Ω), que pot ser utilitzat posteriorment. Per facilitar l'anàlisi de resultats, totes les dades obtingudes amb els diferents experiments es poden exportar de forma senzilla a fitxers de texts tipus text pla o full de càlcul, que poden ser tractats posteriorment mitjançant altres programaris.

Un cop l'etapa d'*Exploració del Món* s'ha completat satisfactòriament donant lloc a un Model del Món, el sistema pot passar a realitzar l'etapa d'*Execució de Tasques*.

Finalment, cal comentar que el programa d'Espai d'Estats també incorpora la possibilitat d'afegir obstacles en la retícula 2D, que suposen novament una senyal '0' o '1' (espai lliure a la retícula o espai ocupat per obstacle) en els sensors $\{S\}$. Aquests obstacles, es poden parametritzar de manera que es considerin fixes o mòbils. Els obstacles fixes representen una barrera similar a una frontera de la retícula 2D, mentre que els mòbils permeten ser traslladats en la direcció de moviment del capçal. En el cas d'objectes mòbils, existeix la possibilitat de definir com afecta el seu moviment al càlcul de costos de les diferents solucions mitjançant un formulari preparat a tal efecte.

Tal com es presenta a la Figura 4.3-3, en el programa "Espai d'Estats" els obstacles es representen en forma de cercles de color blau (la numeració en cadascun dels cercles només apareix per guiar a l'usuari però no es correspon amb cap paràmetre intern de treball dels algorismes). Per més informació sobre els detalls d'operació del programa i exemples d'utilització per a la Construcció de models del món es pot consultar l'*Annex 2. Continguts i utilització del Programari "Espai d'Estats"*.

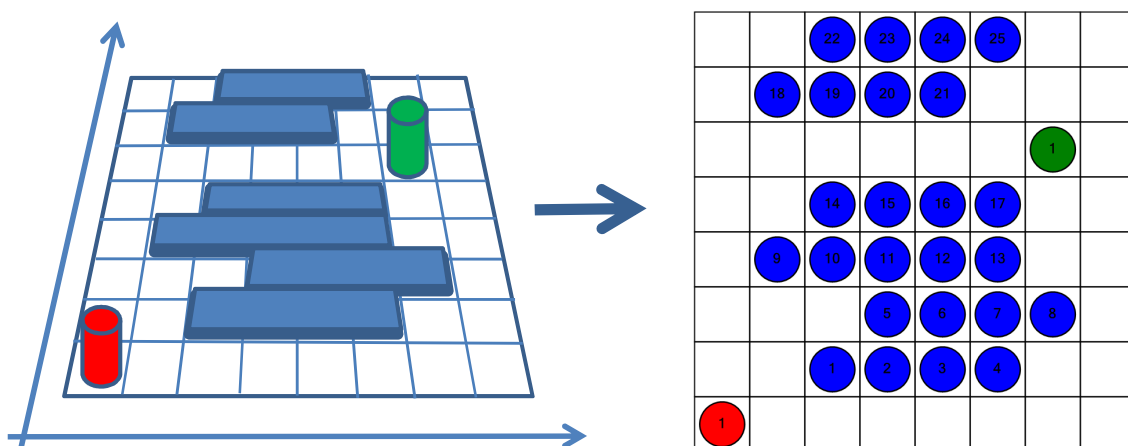


Figura 4.3-3. Situació de Món amb obstacles i representació segons Visual Studio, tot marcant les dues posicions del Capçal: l'Estat Inicial $\{E_0\}$ –en vermell– i l'Estat Final $\{E_f\}$ –en verd–.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

4.4. Estratègies d'Exploració

Per tal de construir els models del món (Ω) que seran necessaris per realitzar les tasques d'assoliment d'objectius finals (etapa d'*Execució de Tasques*), es poden dur a terme diferents tipus d'exploració. Com s'ha comentat a l'apartat anterior, el programa Espai d'Estats permet habilitar tres tipus d'exploració: una per l'usuari i les altres dues automàtiques (exploració *lliure* i exploració *per objectius*).

Deixant de banda l'exploració per usuari, que simplement està implementada per dotar de més funcionalitat al sistema i donar més llibertat a l'usuari, els dos tipus d'exploració automàtica es diferencien pel concepte de fons que els regeix. Així doncs l'*Exploració Lliure* tracta de provar totes les combinacions de senyals als accionaments en tots els estats possibles (Estratègia Exhaustiva) mentre que l'*Exploració per Objectius* tracta d'arribar a un Estat final prèviament marcat com a Objectiu i només explora el que troba en el seu camí (Estratègia no Exhaustiva).

4.4.1. Algoritme d'Exploració Exhaustiva (Exploració Lliure)

L'algoritme d'Exploració Exhaustiva parteix d'un estat inicial $\{E_0\}$, i en cada estat –l'inicial i tots aquells als que va arribant– va realitzant totes les accions possibles (és a dir, va aplicant les diferents consignes $\{\alpha_i\}$) per tal d'anar aprenent a quins nous estats $\{E_i\}$ es va arribant. Dit d'altra manera, es tracta d'una estratègia de construcció de la taula de canvis d'estat $\{F\}$ de manera seqüencial, que no pretén arribar a un estat en particular, sinó que té l'esperit de conèixer el màxim d'estats nous i també aprendre com es pot arribar a cadascun d'ells.

L'algoritme d'Exploració Exhaustiva finalitza quan succeeix el primer dels fets següents:

- i) El sistema arriba a provar totes les combinacions de consignes a tots els estats coneguts durant l'Exploració $\{\xi\}$
- ii) El sistema arriba al màxim nombre d'iteracions permeses (el qual es pot consignar en el Panell d'Execució)

En aquest punt, és important destacar que l'ordre a l'hora d'aplicar les diferents consignes $\{\alpha_i\}$ pot influir en la velocitat per arribar a completar l'experimentació en tots els estats possibles. En efecte, una Estratègia Exhaustiva amb l'ordre de consignes $[\{\alpha_1\}, \{\alpha_2\}, \{\alpha_3\}]$ per a cada estat assolit podria donar models diferents dels d'una Estratègia Exhaustiva amb l'ordre de consignes $[\{\alpha_3\}, \{\alpha_2\}, \{\alpha_1\}]$. Per aquest motiu, un cop seleccionat el tipus d'Estratègia –en aquest cas, *Lliure* (Exhaustiva)– el programa Espai d'Estats demana a l'usuari que defineixi (o seleccioni entre diferents possibles opcions) quina "Estratègia" d'utilització de consignes $\{\alpha_i\}$ vol seguir.

En els casos en que els models incorporin objectes (mòbils o immòbils) i sobretot depenent del tractament que es doni a les fronteres del món, el model del món podrà ser molt diferent i els estats assolits podran ser molt variats. A l'apartat 4.4.3 es recullen les diferents consideracions tingudes en compte durant la programació i la realització d'exemples d'aplicació d'algoritmes.

En el cas general, la especificació de l'Algoritme d'Exploració Exhaustiva per a la Construcció de models del món pot trobar-se a la Figura 4.4-1.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

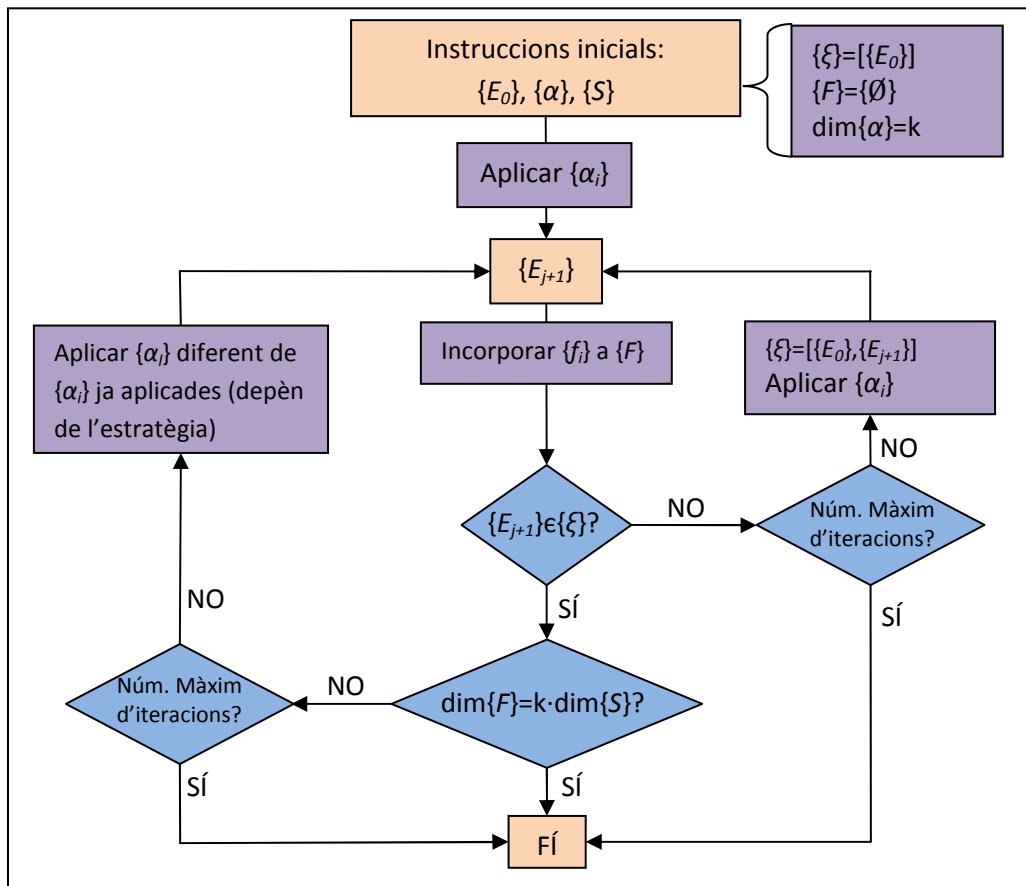


Figura 4.4-1. Algorisme d'Exploració Exhaustiva per a la Construcció de models del món.

4.4.2. Algorisme d'Exploració no Exhaustiva (Exploració per Objectius)

L'algorisme d'Exploració no Exhaustiva parteix d'un estat inicial $\{E_0\}$ i té com a missió última assolir un estat final objectiu anomenat $\{E_f\}$. Per a aconseguir-ho, aplica les diferents consignes $\{\alpha_i\}$ per tal d'anar aprenent a quins nous estats $\{E_i\}$ es va arribant fins arribar a l'estat final desitjat $\{E_f\}$. Dit d'altra manera, es tracta d'una estratègia de construcció de la taula de canvis d'estat $\{F\}$ que pretén arribar a un estat en particular; no es tracta de realitzar en cada estat totes les accions possibles (com passava en l'Estratègia Exhaustiva), sinó que té l'esperit d'arribar a un estat particular tot assolint nous estats intermedis i aprenent com s'arriba a cadascun d'ells.

L'algorisme d'Exploració no Exhaustiva finalitza quan succeeix el primer dels fets següents:

- i) El sistema arriba a l'estat final objectiu $\{E_f\}$
- ii) El sistema arriba al màxim nombre d'iteracions permeses (el qual es pot consignar en el Panell d'Execució)

Tal com succeeix en el cas anterior, l'ordre a l'hora d'aplicar les diferents consignes $\{\alpha_i\}$ pot influir en els resultats obtinguts; en concret en la velocitat per arribar a l'estat final objectiu $\{E_f\}$. De fet, en el moment que es dona per finalitzada l'Estratègia d'Exploració no Exhaustiva

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

no s'han provat totes les consignes $\{\alpha_i\}$ en tots els estats coneguts $\{\xi\}$, sinó al contrari: el model del món generat per una estratègia per objectius no conté tots els estats possibles i funcions de canvi d'estat possibles (d'aquí el seu nom – Estratègia no Exhaustiva). Així doncs, un cop seleccionat el tipus d'Estratègia –en aquest cas, *Per objectius* (no Exhaustiva)- el programa Espai d'Estats demana a l'usuari que defineixi (o seleccioni entre diferents possibles opcions) quina "Estratègia" d'utilització de consignes $\{\alpha_i\}$ vol seguir.

De la mateixa manera que en el cas d'Exploració Exhaustiva, quan els models incorporin objectes (mòbils o immòbils) i sobretot depenent del tractament que es doni a les fronteres del món, el model del món que el sistema construeixi podrà ser molt diferent i els estats assolits podran ser molt variats.

En el cas general, la especificació de l'Algorisme d'Exploració no Exhaustiva per a la Construcció de models del món pot trobar-se a la Figura 4.4-2.

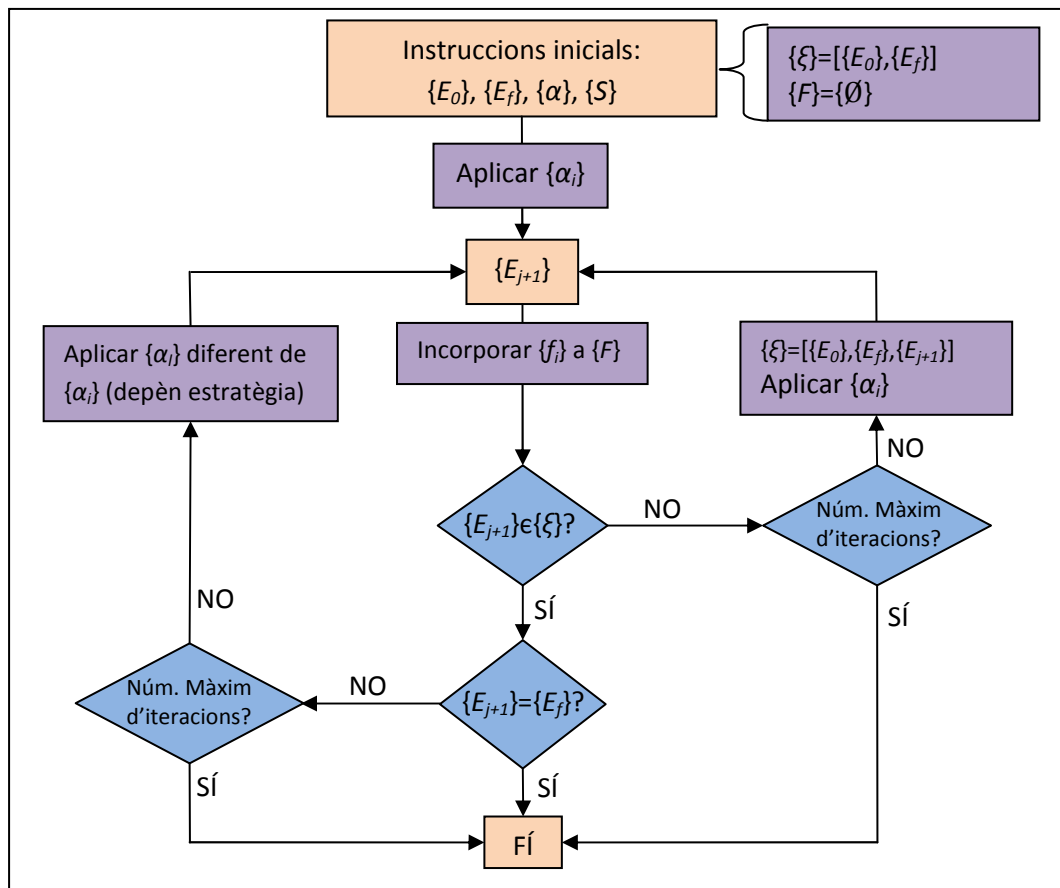


Figura 4.4-2. Algorisme d'Exploració no Exhaustiva per a la Construcció de models del món.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

4.4.3. Tractament de Fronteres i Carrerons sense sortida

En el món real, les màquines-eina tenen fronteres, que es corresponen amb els límits de les curses dels diferents eixos mòbils. Quan un eix arriba al final de la seva cursa, l'única opció que té per sortir-ne és tornar enrere. Aquest fet, que és obvi en els eixos mòbils lineals, també es dóna en algunes màquines per a les topologies d'eixos de revolució, on els eixos –si veritablement disposen de control de posició– només poden girar un cert nombre de graus dins d'un interval (és a dir, no poden girar infinitament en un o altre sentit).

En l'experimentació duta a terme mitjançant el programa "Espai d'Estats", com a primera aproximació i tenint en compte que es pretenen utilitzar un nombre reduït de senyals d'accionaments $\{\alpha_i\}$ i un nombre petit d'espais de retícula ' $N \times M$ ', no s'han considerat fronteres als extrems de la retícula, sinó que s'ha fet una abstracció suposant que els espais de les fronteres de la banda dreta estaven connectats amb els de la banda esquerra i els de la banda superior amb els de la banda inferior. D'aquesta manera s'evita caure contínuament en situacions sense retorn.

Per a experimentacions posteriors, per als casos amb retícules més grans, el programa permet habilitar les fronteres i dur a terme unes simulacions més *naturals*, tot i que indefectiblement amb moltes més dades i per tant molt més difícils de tractar.

De manera similar a les fronteres, existeix la possibilitat que el sistema caigui en un carreró sense sortida format pels obstacles disposats a la retícula. En el context present, es defineix un carreró sense sortida com un estat en el qual el fet d'aplicar-hi qualsevol de les senyals d'actuació disponibles $\{\alpha_i\}$ no provoca un canvi d'estat (veure Figura 4.4-3). Quan això succeeix, el tractament informàtic que es dóna a aquest estat és el de situar-hi un obstacle virtual; de manera que s'impedeix que el sistema hi torni a arribar. Per tal de continuar amb l'exploració, el sistema porta el capçal de nou a l'estat inicial i torna a iniciar l'exploració amb aquesta nova informació.

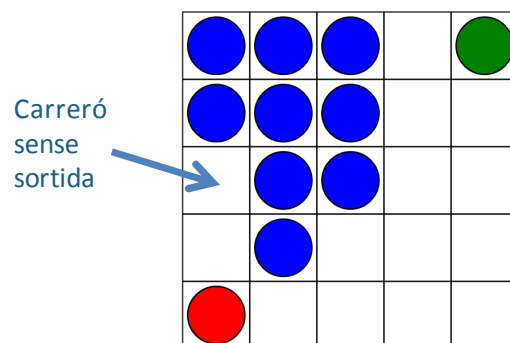


Figura 4.4-3. Carreró sense sortida en una retícula de 5x5 per al joc d' $\{\alpha_i\}$ definit inicialment. Caldrà utilitzar dos obstacles virtuals per impedir que el sistema hi quedi encallat.

El tractament de fronteres i obstacles és un dels aspectes que aporta més versatilitat i possibilitats d'ús al programa d'Espai d'Estats. En efecte, donada la implementació del programa, les senyals de consigna dels accionaments estan desacoblades de la seva realitat física (cada $\{\alpha_i\}$ és només una senyal) i el programa no sap a priori si el seu efecte ha de ser un moviment horitzontal o vertical. De fet, el programa no coneix les dimensions vertical ni horitzontal del taulell 2D, sinó que només treballa amb uns Estats del món en el qual s'hi emmagatzema informació dels diferents sensors allotjats a cada espai de la retícula.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

D'aquesta manera, des del punt de vista algorítmic, al sistema li serà totalment transparent treballar amb consignes $\{\alpha_1\}=\{0,0\}$, $\{\alpha_2\}=\{1,0\}$ i $\{\alpha_3\}=\{0,1\}$ o bé implementar-ne d'altres com per exemple la corresponent al moviment d'un salt del cavall en escacs. Encara més, seguint al fil de la imposició o no de fronteres, també es podran implementar situacions en les que els diferents estats de la retícula 2D continguin connexions entre diferents estats semblants a "forats de cuc" [v]; és a dir estats no continus en la realitat de l'espai físic en 2D però que sí que puguin ser considerats continus en una altra consideració dimensional del sistema.

4.4.4. Exemple d'Exploració amb Algoritme no Exhaustiu

Per tal d'abordar un cas pràctic d'Exploració del món, se suposa com a exemple una retícula 2D molt senzilla amb només quatre posicions (denominades 'A', 'B', 'C' i 'D') disposades en forma de matriu de dues files i dues columnes. En aquesta situació (veure Figura 4.4-4), es pretén realitzar una Exploració no Exhaustiva, fixant com a Estat inicial $\{E_0\}$ la posició 'A', com a objectiu final $\{E_f\}$ la posició 'D' i situant un obstacle inamovible a la posició 'C'.

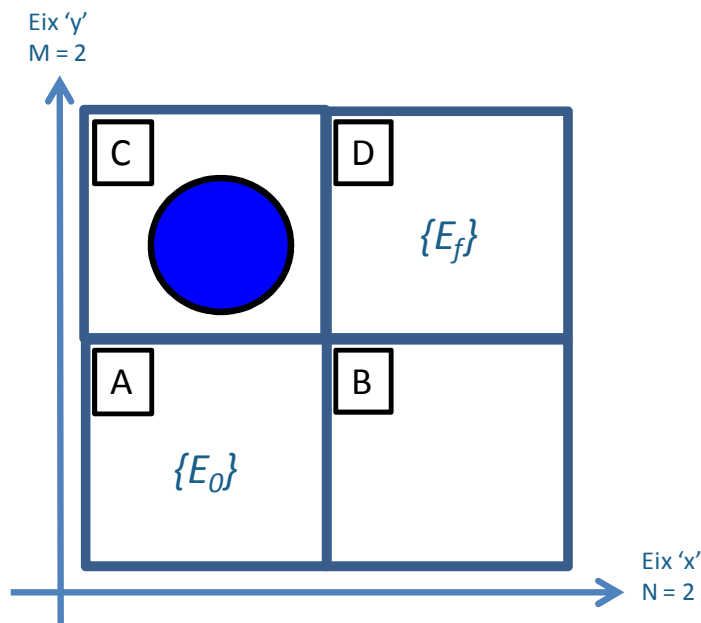


Figura 4.4-4. Retícula 2D de dimensions 2x2 amb situació d'estats inicial i final i obstacle.

Es prenen com a senyals d'actuació el conjunt $\{\alpha_i\}=\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$ on $\{\alpha_1\}=\{0,0\}$, $\{\alpha_2\}=\{1,0\}$ i $\{\alpha_3\}=\{0,1\}$ i com a Estratègia d'Exploració no Exhaustiva la seqüència $\{\alpha_2\}$, $\{\alpha_3\}$, $\{\alpha_1\}$. D'altra banda, seguint amb el ja comentat anteriorment, es considera que no hi ha fronteres i per tant la retícula és connexa per la dreta amb la banda esquerra ('A' també es troba a la dreta de 'B' i 'C' es troba també a la dreta de 'D') i també per la banda superior amb la banda inferior ('A' també es troba a sobre de 'C' i 'B' també es troba a sobre de 'D').

[v] **Forats de Cuc.** Fent servir el símil del món de la física, la referència més adequada que s'ha trobat per a anomenar la connexió entre dos estats que no es troben físicament junts en un hipotètic taulell 2D ha estat el nom de les connexions també anomenades "forats de cuc" o "ponts Einstein-Rosen", que descriuen una hipotètica connexió en forma de drecera per l'espai-temps. En el cas de la modelització lògica del present treball, la drecera del forat de cuc seria implementada a través d'una consigna d'actuació $[\alpha_i]$ determinada.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Amb aquestes premisses, l'Exploració del món comença amb el capçal de la màquina situat sobre la casella de la posició 'A' i se li aplica una senyal d'actuació $\{\alpha_2\}$, la qual mou el capçal fins a la posició 'B'. D'aquesta manera, s'ha passat d'un estat inicial $\{E_0\}=(1,0,1,0)$ a un nou estat que passa a anomenar-se $\{E_1\}=(0,1,1,0)$.

Seguint amb l'exploració prevista, es torna a aplicar $\{\alpha_2\}=(1,0)$ i s'arriba a un estat diferent, si bé aquest no és nou, sinó ja conegut com a $\{E_0\}=(1,0,1,0)$. Com que en aquesta posició ja es coneix quin serà el resultat d'aplicar de nou $\{\alpha_2\}$ -se suposa repetibilitat per a totes les accions del món-, passa a aplicar-se $\{\alpha_3\}=(0,1)$. Malgrat això, com que a la casella de la posició 'C' hi ha un obstacle inamovible, el sistema no canvia d'estat (en aquest cas, l'obstacle sí que actua de frontera). Per això, seguint amb el pla previst, s'aplica la consigna $\{\alpha_1\}=(0,0)$ que també deixa el món inalterat.

Donat que en aquest cas ja s'han explorat totes les senyals $\{\alpha_i\}$ a l'estat inicial $\{E_0\}=(1,0,1,0)$, es realitza de nou la consigna $\{\alpha_2\}$ per tal d'anar a un Estat nou on es pugui seguir cercant una ruta per arribar a l'Estat final desitjat $\{E_f\}$. Un cop el sistema ja torna a trobar-se a l'estat $\{E_1\}=(0,1,1,0)$, s'aplica la consigna $\{\alpha_3\}=(0,1)$ i ara sí s'arriba a un estat nou que coincideix amb l'estat final desitjat: $\{E_f\}=(0,0,1,1)$. El detall d'aquest procés queda resumit gràficament a la representació de la Figura 4.4-5.

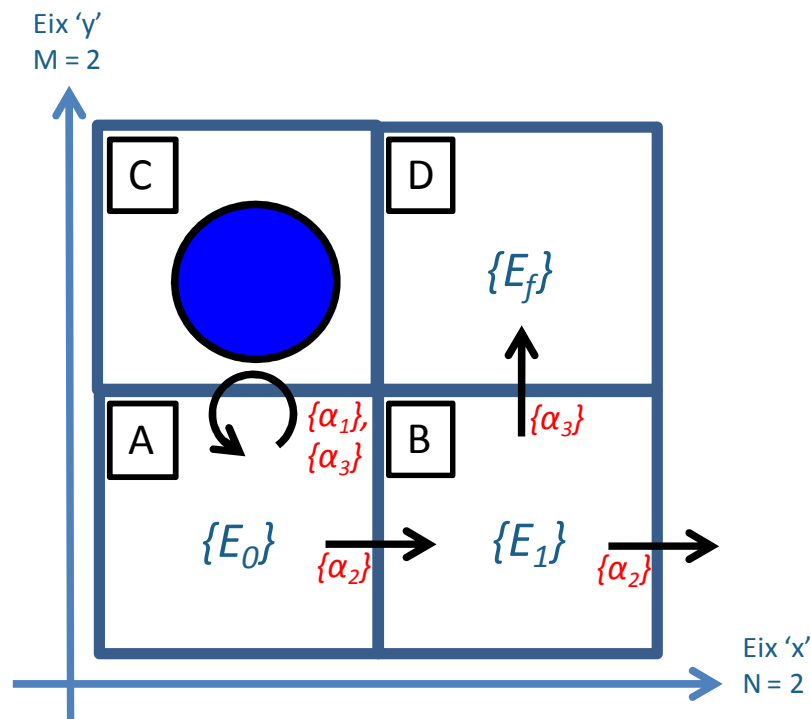


Figura 4.4-5. Retícula 2D de dimensions 2x2 amb situació d'estats inicial, final i intermedi, obstacle i seqüència de consignes $\{\alpha_i\}$ aplicades.

L'ordre de les consignes aplicades ($\{\alpha_2\}, \{\alpha_2\}, \{\alpha_3\}, \{\alpha_1\}, \{\alpha_2\}, \{\alpha_3\}$) ha permès identificar una ruta per arribar a l'estat final desitjat $\{E_f\}$ tot descobrint un estat intermedi necessari $\{E_1\}$. Amb aquesta informació, es pot construir doncs la *Taula de funcions de canvi d'estat* (anomenada $[\psi]$), de la Figura 4.4-6.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

$[\psi]$	$\{\alpha_1\}$	$\{\alpha_2\}$	$\{\alpha_3\}$
$\{E_0\}$	$\{E_0\}$	$\{E_1\}$	$\{E_0\}$
$\{E_1\}$		$\{E_0\}$	$\{E_f\}$
$\{E_f\}$			

Figura 4.4-6. Taula de funcions $[\psi]$ de canvi d'estat per a l'Exploració no Exhaustiva plantejada.

Com es pot apreciar a la Taula de la Figura 4.4-6, l'Exploració no Exhaustiva dona lloc a taules de funcions de canvi d'estat que no tenen complimentades totes les files i columnes. En efecte, aquest tipus d'Estratègia està pensada per minimitzar el temps i les operacions de càlcul i per tant finalitza tan bon punt ha trobat un camí per arribar a la destinació final desitjada.

4.5. Etapa d'Execució de Tasques

A l'exemple de l'apartat anterior (4.4.4 - Cas d'aplicació d'Exploració amb Algoritme no Exhaustiu) s'han identificat 5 funcions diferents de canvi d'estat: $\{F\}=\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\}$, que en concret són aplicables en dos dels estats assolits: $\{E_0\}$ i $\{E_1\}$. L'aplicació d'aquestes funcions als diferents Estats corresponents retorna com a nous estats els Estats recollits a la Tupla $[\psi]$ de la Figura 4.4-6. Amb aquesta informació es pot complementar un model inicial del món Ω_1 (format pels elements $\{\alpha\}$, $\{S\}$, $\{\xi\}$ i $\{F\}$ corresponents al cas '1') i per tant el sistema ja disposa del coneixement suficient per rebre nous $\{E_{02}\}$ i $\{E_{f2}\}$ i engegar l'Etapa d'Execució de Tasques.

Donat que s'exigirà que $\{E_{02}\}$ i $\{E_{f2}\} \in \{\xi\}$, probablement haurà d'existir com a mínim una solució vàlida $\sigma_{2,1}$. De fet, l'únic cas en que no existiria solució possible seria si la realització de l'experimentació s'hagués dut a terme en diferents rondes que haguessin donat com a resultat grafs que continguessin estats orígens i finals de manera inconnexa. Altrament, en cas que existeixi més d'un camí possible, apareixeran més solucions $\sigma_{2,i}$; les quals s'hauran de comparar per tal d'establir quina d'elles comporta un cost menor. D'altra banda, també podran introduir-se prejudicis per tal de trobar altres solucions; les quals s'hauran d'avaluar (per confirmar que són correctes) i també comparar (per assegurar que la solució escollida és la que presenta un cost òptim ' C_{02-f2}^* ' per a la resolució de la Tasca encomanada).

En els casos d'empat, per defecte, el sistema mantindrà la primera solució a la que hagi arribat. Si l'empat es produeix amb solucions construïdes a partir de prejudicis, encara que aquestes solucions no siguin les escollides (perquè el sistema mantingui la primera solució de cost mínim coneguda), sí que s'ampliarà el Model de Món per incorporar les noves regles inferides i contrastades.

4.5.1. Algoritmes d'Execució de Tasques

L'Algoritme d'Execució de Tasques sobre un Model del Món $\{\Omega_1\}$ és el que es presenta a la Figura 4.5-1. Bàsicament, es tracta d'un algoritme que explora la informació continguda en la Tupla $[\psi]$ per tal d'aconseguir determinar un camí que uneixi l'Estat Final desitjat $\{E_{f2}\}$ a partir de l'Estat Inicial fixat $\{E_{02}\}$. Per tant, es tracta d'un Algoritme de camins mínims que es dedica a construir un camí començant des de l'extrem final i retrocedint Estat a Estat.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

De cara a recollir la informació de l'itinerari, l'Algoritme s'ajuda de les variables " λ_i " i " δ_i " on va emmagatzemant la informació de les files i columnes de la Tupla $[\psi]$ (és a dir " E_i " i " α_i " respectivament) que va recorrent en el seu procés d'arribada a l'origen. De fet, aquesta informació es tracta de la descripció en ordre invers de l'aplicació de les Funcions de Canvi d'Estat " α_i " aplicades a cada Estat assolit durant el trajecte " E_i " per tal de realitzar la tasca encomanada.

Començant des de l'Estat Final ' E_{02} ', el sistema cerca un estat immediatament anterior ' E_{f-1} ' des del qual pugui arribar-se al citat Estat final aplicant una determinada consigna d'accionaments ' α_i '. La informació d'aquest estat immediatament anterior serà emmagatzemada a la variable " λ_i " i la informació sobre la consigna aplicada, a la variable " δ_i ". Cada cop que el sistema seleccioni un estat immediatament anterior, caldrà corroborar si aquest estat intermedi no és ja l'estat inicial de partida, el qual significaria que ja s'ha completat el camí " $E_{f2} \rightarrow E_{02}$ ".

Per a cadascuna de les solucions de camí mínim trobades, l'algoritme en realitza una assignació de solució " $\sigma_{2,i}$ " on les consignes dels accionaments s'endrecen segons l'ordre d'origen a final a partir de la informació continguda en les variables " δ " ($\{\alpha_{\sigma_{2,i}}\} = \{\alpha_{\sigma_{2,i}}^1, \alpha_{\sigma_{2,i}}^2, \dots, \alpha_{\sigma_{2,i}}^n\} = \{\delta_n, \delta_{n-1}, \dots, \delta_1\}$), i els estats assolits s'endrecen segons l'ordre d'origen a final a partir de la informació continguda en les variables " λ " ($\{\xi_{\sigma_{2,i}}\} = \{\xi_{\sigma_{2,i}}^1, \xi_{\sigma_{2,i}}^2, \dots, \xi_{\sigma_{2,i}}^n\} = \{\lambda_n, \lambda_{n-1}, \dots, \lambda_1\}$). A continuació s'avalua el cost de la solució trobada i es selecciona com a millor solució aquella que tingui un cost menor fent una comparació amb la resta de solucions trobades.

Durant la realització d'aquest procés, existeix la possibilitat que un mateix estat pugui ser assolit des d'un estat anterior a través de dues (o més) consignes diferents; és a dir, mitjançant diverses branques diferents del graf (aplicant varies ' α_i ' diferents). En aquests casos, el sistema pren la primera solució segons el criteri de recorregut de la Tupla $[\psi]$ (d'esquerra a dreta i de dalt cap a baix) però guarda les altres solucions per tal d'explorar-les posteriorment. En aquests casos tot i que la seqüència d'estats serà la mateixa, els costos de prendre un o altre camí podrien alterar el resultat final i per tant la determinació del camí òptim (o de menor cost).

Així mateix, durant la realització d'aquest procés, existeix la possibilitat que el sistema explori camins que no porten fins a l'estat inicial desitjat $\{E_{02}\}$; dit d'altra manera, pot ser que el sistema entri en direccions sense sortida o branques del conjunt de camins. En aquests casos, l'algoritme marca aquests Estats com a direccions sense sortida i retrocedeix fins arribar a un Estat intermedi en el que es pugui prendre una bifurcació alternativa. Si en desfer el camí el sistema arriba de nou a l'estat on ha començat l'exploració $\{E_{f2}\}$, cal cercar una nova via per intentar arribar a l'estat final.

El sistema finalitza la realització de l'algoritme quan s'assegura que ja ha traçat tots els recorreguts possibles (haurà construït un arbre de solucions) i per tant la cerca està completa.

En acabar la realització de l'Algoritme d'Execució de Tasques sobre un Model del Món donat $\{\Omega_1\}$, el sistema té un conjunt de solucions vàlides per resoldre la Tasca " $E_{f2} \rightarrow E_{02}$ " (un cop més se suposa que aquest conjunt no és buit, tot i que podria arribar a ser-ho en funció de com s'hagués dut a terme la Experimentació). Amb aquest conjunt de solucions $\{\sigma_{2,i}\}$ es pot realitzar la tasca encomanada (de fet es coneix quina és la solució òptima –o de cost mínim entre les solucions possibles-) o bé es poden intentar elaborar prejudicis per tal d'establir funcions $\{f_i\}$ desconegudes o també es pot optar per explorar més per comprovar si poden existir noves funcions $\{f_i\}$.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

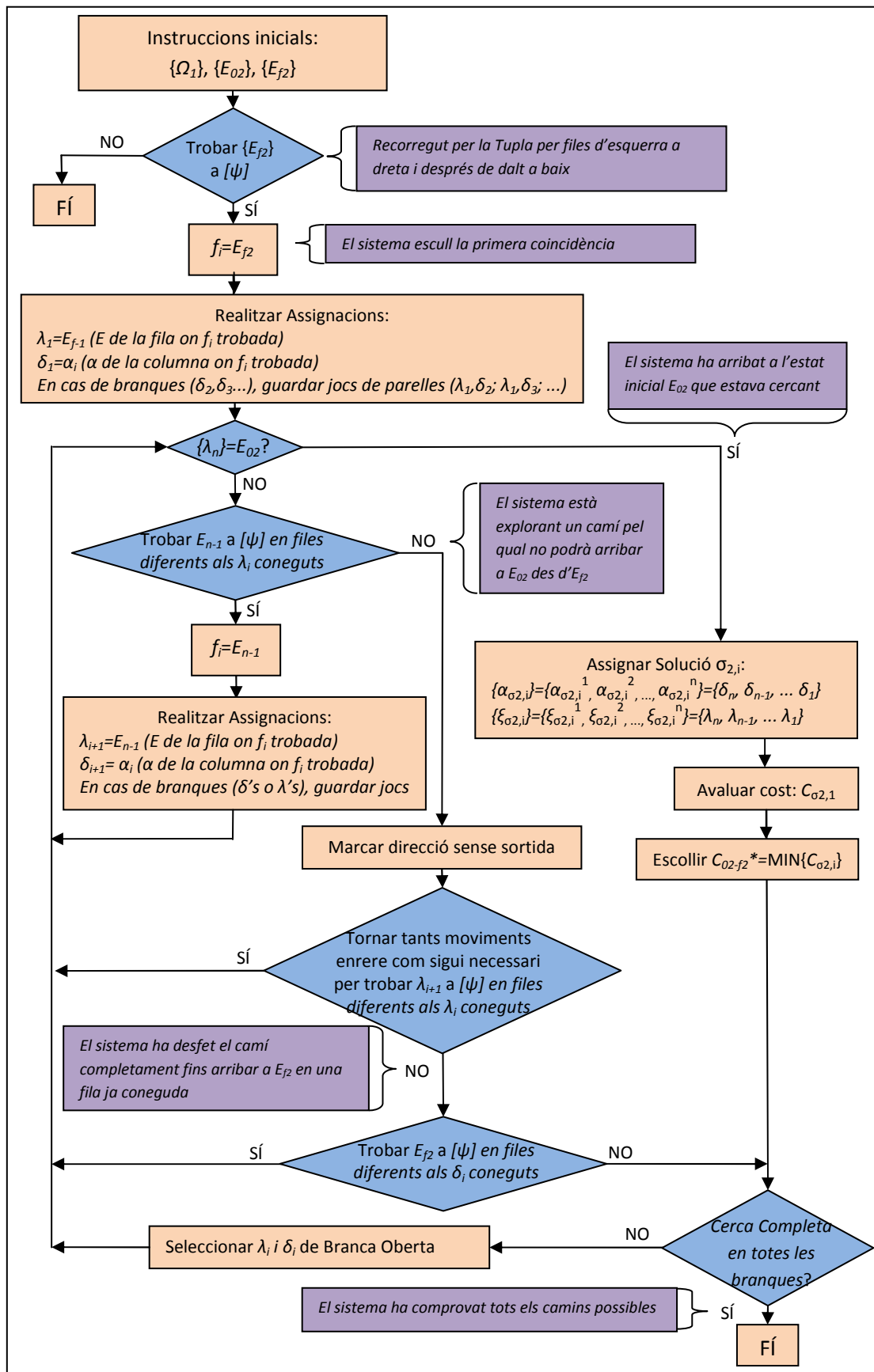


Figura 4.5-1. Algorisme d'Execució de Tasques sobre un Model del Món $\{\Omega_1\}$.

4.5.2. Avaluació de Costos de Solucions

L'algoritme presentat a la Figura 4.5-1 (Algoritme d'Execució de Tasques sobre un Model del Món $\{\Omega_1\}$) imposa necessàriament l'avaluació dels costos associats a cada solució completa trobada durant l'escrutini del Model del Món $\{\Omega_1\}$ (camí practicable entre E_{02} i E_{f2}). El motiu d'aquesta imposició és poder seleccionar la millor solució (o solució òptima) com aquella que comporta un cost de realització menor.

A nivell d'implementació, el Cost de la Solució està programat mitjançant una funció de càlcul de cost que pot ser parametritzada per l'usuari. Com a norma general, la funció de cost es calcula com el sumatori del nombre d'accions realitzades per arribar a l'Estat Final desitjat a partir de l'Estat Origen fixat. Aquesta expressió del cost (Veure Equació 4.5-1), respon a imposar que totes les consignes enviades al sistema tenen el mateix cost energètic en ponderació, que se suposa igual a 1.

$$(Eq. 4.5-1) \quad C_{\sigma_2,i} = \sum_{r=1}^{r=n} (|\alpha_{\sigma_2,i}^r| \cdot 1) = (|\alpha_{\sigma_2,i}^1| + |\alpha_{\sigma_2,i}^2| + \dots + |\alpha_{\sigma_2,i}^n|)$$

*on 'i' és la solució concreta que es vol avaluar per al cas σ_2
i 'r' la seqüència de $\alpha_{\sigma_2,i}$ que cal realitzar per anar de E_{02} i E_{f2}*

D'altra banda, en aquest cas general, si el mòdul de cada consigna enviada és també igual a 1 (el qual és cert per exemple en l'especificació de les consignes $\{\alpha_2\}=\{1,0\}$ i $\{\alpha_3\}=\{0,1\}$), es pot donar el cas més senzill on $C_{\sigma_2,i}=n$.

Malgrat aquesta formula utilitzada en el cas general, tal com s'ha comentat anteriorment, en la realitat física, el cost de realitzar una acció segons una o altra consigna (és a dir, aplicant una o altra $\{\alpha_i\}$) podria ser diferent degut a motius de construcció del sistema (eixos col·locats en arquitectures sèrie, o bé directament diferents tipus d'accions per a cada entitat activa $\{\alpha_i\}$) present al sistema. Per a aquests casos, la formula de càlcul del cost s'estén introduint nous paràmetres que bàsicament suposen ponderar el cost relatiu de cadascun dels nivells de costos incorreguts en l'activació d'una o altra consigna (Veure Equació 4.5-2).

$$(Eq. 4.5-2) \quad C_{\sigma_2,i} = \sum_{r=1}^{r=n} (|\alpha_{\sigma_2,i}^r| \cdot \rho_{\alpha_{hr}}) = (|\alpha_{\sigma_2,i}^1| \cdot \rho_{\alpha_{h1}} + \dots + |\alpha_{\sigma_2,i}^n| \cdot \rho_{\alpha_{hn}})$$

*on 'i' és la solució concreta que es vol avaluar per al cas σ_2 ,
 $\rho_{\alpha_{hr}}$ és el pes de la α_{hr} utilitzada corresponent en cada cas ($\dim\{\alpha\}=k$),
i 'r' la seqüència de $\alpha_{\sigma_2,i}$ que cal realitzar per anar de E_{02} i E_{f2}*

D'altra banda, donada la naturalesa del programa, també és important poder quantificar quin és el cost d'obtenció d'un Model del Món determinat, o també el cost de poder arribar a una solució de camí practicable. Aquests dos costos, que es concreten en el nombre de passos realitzats per obtenir solucions (Etapa d'Exploració del Món o Etapa d'Execució de Tasques) estan controlats per l'historial de sortida del programa "Espai d'Estats" i acotats pel nombre d'iteracions màximes que permet el propi programa.

4.5.3. Aplicació de Prejudicis

Tal com s'ha comentat a l'apartat anterior, l'algoritme presentat a la Figura 4.5-1 (Algoritme d'Execució de Tasques) treballa sobre un *Model del Món* $\{\Omega_1\}$ que s'ha construït en l'Etapa d'Exploració del Món. En el cas particular que el *Model del Món* $\{\Omega_1\}$ s'hagi obtingut mitjançant una Exploració Exhaustiva (o també anomenada Exploració Lliure), el model contindrà totes les combinacions possibles d'aplicació de consignes diferents $\{\alpha\}$, en tots els Estats possibles assolits $\{\xi\}$. De fet, el conjunt d'estats assolits (coneguts) $\{\xi\}$ contindrà tots els estats possibles en el Món que puguin ser detectats amb el conjunt de sensors disponibles $[S]$. Amb això, les Funcions de Canvi d'Estat $\{F\}$ estaran completament determinades i la Tupla $[\psi]$ no tindrà cap casella sense informació.

Ara bé, en els casos en que l'exploració hagi estat empresa mitjançant un Algoritme No Exhaustiu (Exploració per Objectius), existeix la possibilitat que el Model del Món no hagi explorat totes les combinacions possibles de consignes diferents $\{\alpha\}$ en cada Estat assolit $\{\xi\}$; o dit d'altra manera, que la Tupla $[\psi]$ tingui caselles sense informació. De fet, en aquest cas, no és segur que el sistema hagi ni tant sols visitat tots els estats i per tant $\{\xi\}$ pot no contenir tots els Estats possibles del Món $[E]$ de manera que la Tupla $[\psi]$ no tindrà totes les files que poden existir en un donat Món.

Per tant, ja es veu que el problema de construir un nou Model del Món $\{\Omega_2\}$, que contingui i amplii la informació coneguda en el Model del Món inicial $\{\Omega_1\}$, consistirà en aplicar mètodes per omplir la Tupla $[\psi]$ així com mètodes per ampliar el nombre de files i per tant suposar que existiran més Estats Possibles $\{\xi\}$ que encara no han estat visitats.

Aquests mètodes per omplir la Tupla $[\psi]$ s'implementen mitjançant el que s'anomena com "Aplicació de Prejudicis", doncs fonamentalment es tracta de suposar una hipòtesi no descoberta en les Etapes d'Exploració (per tant, no contrastada a priori) i realitzar la Etapa d'Execució de Tasques suposant-la com a certa. Si a partir d'aquestes suposicions el programa troba una solució correcta per a la Tasca encomanada, el sistema executa la resolució (en mode experimental) i en cas que el Món es comporti tal com s'havia suposat, s'amplia el Model Corresponent donant lloc a un nou Model del Món $\{\Omega_2\}$, que en essència conté la informació coneguda en el Model del Món inicial $\{\Omega_1\}$ i la amplia amb les suposicions prejutjades i confirmades.

L'aplicació de Prejudicis es pot realitzar doncs ampliant el Model del Món de les dues maneres diferents que es recullen a continuació:

- i) Prejudicis sobre *Funcions de Canvi d'Estat* $\{F'\}$

Els anomenats "Prejudicis de Canvi d'Estat" són aquells que proposen hipòtesis per omplir les caselles de les files i columnes buides en la Tupla $[\psi]$. Tot i que a priori es podria suposar qualsevol resultat possible –de fet, l'aplicació d'una determinada consigna en un determinat estat podria donar com a resultat qualsevol Estat Final–, en la implementació realitzada en la present Tesi Doctoral només es tenen en compte els dos tipus següents:

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

- *Inferència Associativa*: Si una determinada consigna $\{\alpha_i\}$ implica sempre el mateix resultat (assoliment d'un mateix Estat Final en tots els Estats als quals s'aplica), en aquells Estats en els que encara no s'hi ha aplicat produirà també el mateix resultat.
- *Abstracció per Analogia*: Si dos conjunts d'estats estan "alineats" de manera que una determinada consigna $\{\alpha_i\}$ implica un recorregut creixent i seqüencial en els estats (conjunt per conjunt), és possible que també estiguin alineats de la mateixa manera en alguna altra direcció principal per a alguna altra consigna $\{\alpha_i\}$ amb 'i' diferent de l'anterior.

Dit d'altra manera, la *Inferència Associativa* és el tipus de prejudici que serveix per establir patrons de conducta lligats a funcions invariants en el temps (per exemple funcions de tornada a origen) i que per tant sempre retornen el mateix resultat independentment de l'estat on siguin aplicades.

D'altra banda, l'*Abstracció per Analogia*, molt més complexa que l'anterior, està orientada a trobar patrons de comportament entre conjunts d'Estats, aprofitant la "ordenació" que aquests puguin tenir en la realitat. Per posar un exemple, en el cas estudiat a l'Apartat 4.4.4. (i en aquest cas prescindint de l'obstacle situat a C), els estats de les posicions 'A' i 'B' de la retícula 2D estan alineats horitzontalment de la mateixa manera que els estats de les posicions 'C' i 'D'. De fet, el sistema desconeix que estiguin alineats segons la horitzontal, però coneix que estan orientats segons la consigna $\{\alpha_2\}$. Per aquest motiu, si el sistema descobreix que les posicions 'A' i 'C' estan orientades segons la consigna $\{\alpha_3\}$, podria aplicar el prejudici per *Abstracció per Analogia* que els estats 'B' i 'D' també ho estan i així omplir la posició corresponent a la Tupla $[\psi]$ de *Funcions de Canvi d'Estat* amb la consigna corresponent $\{\alpha_3\}$. L'*Abstracció per Analogia*, és un cas particular de la tècnica lògica anomenada com a *Abstracció Incompleta*.

L'aplicació dels prejudicis presentats sobre *Noves Funcions de canvi d'estat $\{F\}$* segueix un procediment assimilable a la selecció de camins en els sistemes d'optimització de colònies de formigues (AOC, "*Ant Colony Optimization*") visitades a l'Estat de l'Art. En aquests sistemes *naturals* d'Optimització els camins utilitzats per les formigues d'una colònia són marcats hormonalment a mesura que són utilitzats per les membres de la colònia de manera que els camins més utilitzats tenen més intensitat que aquells poc utilitzats. Tant en la *Inferència Associativa*, com en l'*Abstracció per Analogia*, les *Noves Funcions de canvi d'estat $\{F\}$* tindran més possibilitats de ser correctes en funció de quantes vegades es compleixin en altres casos del mateix *Model del Món*.

ii) Prejudicis sobre *Nous Estats no visitats* (o no assolits) $\{\xi\}$

De la mateixa manera que es poden establir mètodes per omplir la Tupla $[\psi]$ de *Funcions de Canvi d'Estat* amb Estats ja coneguts (o ja visitats) $\{E\} \in \{\xi\}$, també es poden omplir les caselles sense informació de $[\psi]$ amb nous Estats no Visitats però que podrien existir $\{\xi\}$. Fent-ho així, inevitablement s'haurà d'ampliar el nombre de files de $[\psi]$, de manera que es generaran noves caselles buides que al seu torn s'hauran d'omplir utilitzant *Prejudicis sobre Funcions de Canvi d'Estat $\{F\}$* o altres rondes d'Exploració del Món.

Un cop més, els prejudicis de Nous Estats es poden aplicar en qualsevol casella de la Tupla $[\psi]$ que no tingui informació. Malgrat això, en la present Tesi Doctoral només es considerarà la

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

possible existència de Nous Estats no coneguts seguint una regla anomenada com a regla de *Completesa del Món*, que es basa en la hipòtesi que els sistemes són complets en les seves consignes d'actuació (tal com es suposa en els *sistemes amb completesa Ontològica*; on un element pot tenir la propietat 'P' o la 'No-P'). Per tant, donat un sistema amb 'NxM' Senyals de sensors i 'k' consignes diferents aplicables, el sistema podria arribar a tenir 'NxM' estats diferents sobre les quals es podrien aplicar '(NxM)·k' *Funcions de Canvi d'estat*.

En el cas de sistemes amb variables binàries una senyal (o vàries) d'un sensor (o de sensors diferents) passa de valdre '0' a valdre '1' (o viceversa) per causa d'activar una consigna $\{\alpha_i\}$ determinada. Si existeix alguna senyal d'un sensor particular del conjunt $\{S\}$ que no s'hagi vist modificada en cap de les aplicacions de consignes realitzades en un conjunt d'Estats entre els Estats assolits $\{\xi\}$, i es fa la suposició que tots els sensors del conjunt han estat muntats en el sistema perquè són rellevants per al procés, es pot suposar plausible que existeixi un Estat encara no conegut on l'aplicació d'una consigna canviï el valor de '0' a '1' de dit Sensor que ha restat invariant fins al moment.

Per tal d'omplir les caselles tant de les noves files generades com també les caselles buides de $[\psi]$ es faran servir els dos criteris ressenyats per a l'aplicació de Prejudicis sobre *Funcions de Canvi d'Estat* $\{F'\}$, tant el de *Inferència Associativa* com el de *Abstracció per Analogia* segons correspongui.

La introducció dels Prejudicis (siguin del tipus que siguin) implicaran la introducció de Noves regles (Veure Figura 4.2-2) que hauran de ser contrastades mitjançant la experimentació:

- $\{\xi'\}$: Llista d'estats possibles per hipòtesi
- $\{F'\}$: Funcions de canvi d'estat per hipòtesi

Com es pot intuir, la potència de la Construcció de Models del Món rau en gran mesura en la capacitat de poder realitzar cerques no Exhaustives (que seran molt més econòmiques en quantitat de temps de computació i cost d'exploració), que donaran lloc a models senzills i que posteriorment podran ser ampliat de manera ràpida mitjançant l'aplicació de Prejudicis lògics com els introduïts en el present apartat.

Un anàlisi de la literatura revela que en la Investigació Operativa el cost de l'obtenció de solucions és un camp àmpliament estudiat. En efecte, no es tracta només d'avaluar si un sistema pot trobar informació, sinó d'arribar a un compromís sobre quin cost té trobar dita informació. Posat en el context del present treball, fer cerques exhaustives pot proporcionar una informació completa del Món que pot servir per arribar a discernir quina és la millor estratègia per arribar a un estat final des d'un estat inicial. Malgrat això, la realització de cerques exhaustives pot tenir un cost molt elevat que difícilment es vegi compensat per l'estalvi en el cost de la solució òptima respecte a una altra solució factible.

Autors com Blum i Roli^[75], visitats durant l'Estat de l'Art, tracten la importància de l'aplicació de tècniques per a obtenir components de "intensificació" i "diversificació" de solucions en la resolució d'un determinat problema. La component de "intensificació" respon a la necessitat de tenir coneixement més en detall d'una determinada zona de solucions. Per exemple en llocs propers a l'Estat inicial i Final d'una especificació de tasques, pot ser bo tenir informació amb més nivell de detall. Així mateix, la component de "diversificació" respon a la necessitat de tenir coneixement de solucions molt diferents entre sí per tal de trobar respostes alternatives

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

a la resolució, per exemple, de camins mínims per trobar el millor trajecte entre estats Inicial i Final.

4.5.4. Exemple pràctic de l'Etapa d'Execució de Tasques

Per tal de realitzar un exemple d'aplicació pràctica de l'Etapa d'Execució de Tasques es pren el mateix sistema analitzat a l'apartat 4.4.4. utilitzat per il·lustrar l'Etapa d'Exploració per a l'obtenció de *Models del Món* amb Algoritmes d'exploració *No Exhaustiva*.

En el seu estudi -retícula 2D molt senzilla amb només quatre posicions (denominades 'A', 'B', 'C' i 'D') disposades en forma de matriu de dues files i dues columnes mostrada a la Figura 4.4-4, s'havia fixat com a Estat inicial $\{E_0\}$ la posició 'A', com a objectiu final $\{E_f\}$ la posició 'D' i s'havia situat un obstacle inamovible a la posició 'C'. El resultat de l'exploració pel que fa a Funcions de Canvi d'Estat és el que recull la taula de la Figura 4.4-6, que en essència és una Taula amb determinades caselles sense informació però amb la informació suficient per arribar dels estats $\{E_0\}$ a $\{E_f\}$ fixats.

En aquest cas, com a primera Tasca Encomanada, es fixen de nou $\{E_{02}\}='A'$ i $\{E_{f2}\}='D'$ que de fet són els mateixos que s'havien fixat en la Etapa d'Exploració del Món (tot i que podrien ser diferents).

Fent això, i utilitzant l'Algoritme presentat a la Figura 4.5-1, el primer que fa el sistema és fer un recorregut per la Tupla $[\psi]$ (presentada a la Figura 4.4-6) per files d'esquerra a dreta i després de dalt a baix amb la intenció de trobar l'estat Final desitjat $\{E_{f2}\}$ en alguna de les caselles. Com que el sistema troba aquest valor a la segona fila (corresponent a l'Estat anterior $\{E_{11}\}$) i a la tercera columna (corresponent a la consigna $\{\alpha_3\}$) el sistema sap que una manera d'arribar a l'Estat Final desitjat $\{E_{f2}\}$ és a partir d'un Estat anterior $\{E_1\}$ que serà anomenat com a estat intermedi i aplicant la consigna $\{\alpha_3\}$.

L'Estat anterior $\{E_1\}$ no és l'Estat Inicial de partida $\{E_{02}\}$ (de fet, $\{E_{f2}\}='D'$) i per tant caldrà seguir buscant altres canvis d'estat per aconseguir un camí practicable entre origen i final. Abans, però, el sistema emmagatzemarà $\{\delta_1\}=\{\alpha_3\}$ i $\{\lambda_1\}=\{E_1\}$.

El següent pas serà trobar l'Estat $\{E_{n-1}\}$ a la Tupla $[\psi]$ en files diferents a aquelles que es troben entre els estats $\{\lambda_j\}$ ja coneguts. En el cas d'estudi, es tractarà de trobar l'Estat $\{E_1\}$ en alguna capçalera de fila, o dit d'altra manera, es tractarà de trobar un estat precedent (serà l'Estat $\{E_{n-2}\}$) a l'estat intermedi trobat $\{E_1\}$ des del qual s'hi pugui arribar aplicant una determinada consigna que es llegirà a l'encapçalament de la columna. Fent aquesta cerca, es pot trobar l'estat $\{E_1\}=\{E_{n-1}\}$ a la primera fila ($\{E_{n-2}\}=\{E_{01}\}$) i en concret a la segona columna $\{\alpha_2\}$. Serà llavors quan el sistema emmagatzemarà $\{\delta_2\}=\{\alpha_2\}$ i $\{\lambda_2\}=\{E_0\}$.

Donat que, ara sí, $\{\lambda_2\}=\{E_0\}='A'=\{E_{02}\}$, es pot donar per completada la cerca d'un camí " $E_{f2} \rightarrow E_{02}$ ", es pot procedir a assignar les característiques (Equacions 4.5-3, 4.5-4) i a determinar el cost (Eq. 4.5-5) de la primera solució trobada per a la tasca 2 (també anomenada $\{\sigma_{2,1}\}$):

$$(Eq. 4.5-3) \quad \{\alpha_{\sigma_{2,1}}\}=\{\alpha_{\sigma_{2,1}}^1, \alpha_{\sigma_{2,1}}^2, \dots, \alpha_{\sigma_{2,1}}^n\}=\{\delta_n, \delta_{n-1}, \dots, \delta_1\}=\{\delta_2, \delta_1\}=\{\alpha_2, \alpha_3\}$$

$$(Eq. 4.5-4) \quad \{\xi_{\sigma_{2,1}}\}=\{\xi_{\sigma_{2,1}}^1, \xi_{\sigma_{2,1}}^2, \dots, \xi_{\sigma_{2,1}}^n\}=\{\lambda_n, \lambda_{n-1}, \dots, \lambda_1\}=\{\lambda_2, \lambda_1\}=\{E_1, E_{02}\}$$

$$(Eq. 4.5-5) \quad C_{\sigma_{2,i}} = \sum_{r=1}^n (|\alpha_{\sigma_{2,i}}^r| \cdot 1) = (|\alpha_{\sigma_{2,i}}^1| + |\alpha_{\sigma_{2,i}}^2|) \cdot 1 = (1 + 1) \cdot 1 = 2$$

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

D'altra banda, donat que no es pot trobar l'Estat Final desitjat en cap altra fila de la Tupla $[\psi]$ de la fila on ja ha estat trobada i com que no han quedat branques obertes (no s'ha trobat l'estat intermedi $\{E_1\}$ en cap altra fila que en la primera, es pot dir que no existeixen altres solucions conegudes per al camí i per tant que amb el Model de Món inicial $\{\Omega_1\}$, la solució òptima per a la Tasca 2 encomanada és $\{\sigma_{2,1}\}$ (és a dir: $\{\sigma_2^*\}=\{\sigma_{2,1}\}$ i $C_{\sigma_2^*}=C_{\sigma_{2,1}}$).

La representació gràfica d'aquest camí sobre la hipotètica retícula 2D és la que es mostra a la Figura 4.5-2.

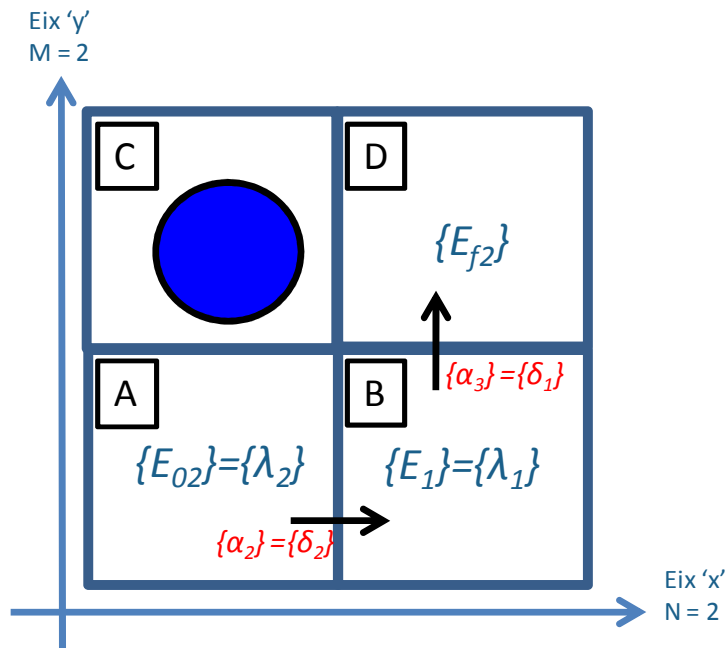


Figura 4.5-2. Algoritme d'Execució de Tasques sobre un Model del Món $\{\Omega_1\}$.

Capítol 5. Exploració d'algoritmes en sistemes amb variables binàries i contínues

5.1. Definició de sistemes amb variables contínues

En el Capítol 4, s'han especificat uns algoritmes de construcció de Models del Món i se n'ha estudiat l'ús en mons poblats només per variables binàries, és a dir, que només poden prendre els valors '0' o '1'. Aquests mons són representatius de sistemes automàtics amb moviments repetitius com alguns dels que s'han estudiat en els diferents Capítols anteriors (per exemple en el Capítol 3, quan es definien els Accionaments *agafador*, *atraient*, *entrant*, *posicionador*, *transportador* i *sortint*) i per tant és una especificació molt pràctica per a multitud de cèl·lules i sistemes de fabricació.

Malgrat això, en determinades topologies de sistemes de fabricació i en concret en el cas de les màquines-eina, els elements més importants que cal controlar són els que es realitzen a través dels diferents eixos mòbils, que són la característica principal de la seva topologia.

Per als casos en que és necessari realitzar una especificació de moviments continus, es pot optar per dissenyar una topologia que tingui una resolució molt elevada. En efecte, en les retícules 2D confeccionades sobre la base de la plataforma d'experimentació d'"Espai d'Estats" es pot ampliar el nombre de posicions en qualsevol de les direccions principals. Per tant, es pot obtenir una modelització "quasi" contínua (o més aviat, contínua en el límit) a partir d'augmentar la resolució de la retícula per tal d'aportar més definició a l'avanç en cadascuna de les direccions (Veure Figura 5.1-1).

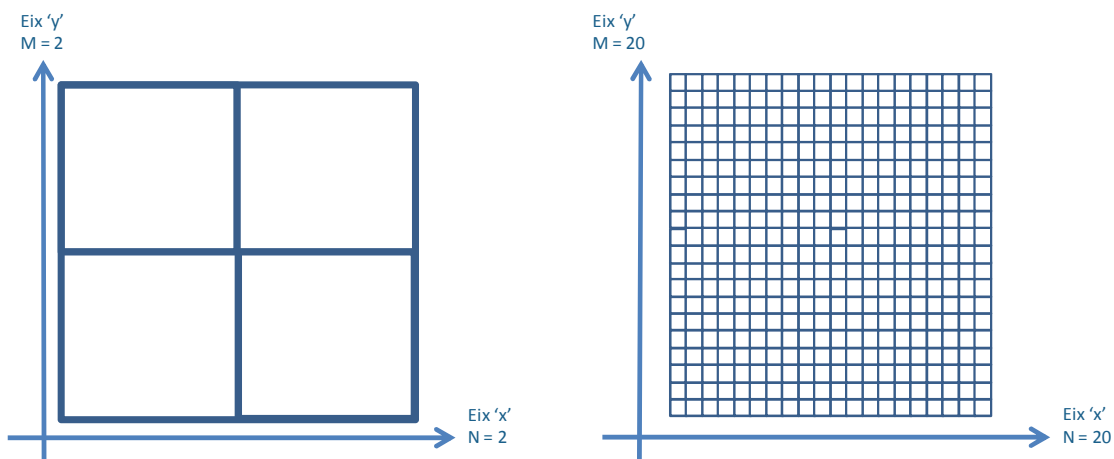


Figura 5.1-1. Diferents nivells de resolució per a una retícula 2D: Esquerra ' $N \times M = 2 \times 2$ ', Dreta: ' $N \times M = 20 \times 20$ '.

Ara bé, per tal de fer viable aquesta modelització, caldria col·locar multitud de sensors en totes les posicions necessàries per a cadascun dels espais de la retícula, tot fent créixer el nombre de variables en el sistema, en el límit, fins a l'infinit. D'altra banda, una possible modelització

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

complementaria consisteix en fer ús del tercer Corol·lari enunciat per al Model de comportament de sistemes lògics de Gomà i Vivancos, que determina que els models del món no són únics. Així doncs, es pot establir que de la mateixa manera que es pot determinar un món utilitzant vint variables binàries (per exemple, en el cas de la Figura 5.1-1 on es té una retícula de vint posicions binàries) que només poden prendre '0' o '1' com a valor, també es pot modelitzar la mateixa situació utilitzant una variable, que s'anomenarà "contínua" i que pugui prendre un cert nombre de valors dins d'un rang (en el mateix exemple, vint; tot i que en el límit podrien tendir a infinit).

Aquest tipus de modelització pot servir per simplificar enormement la quantitat de variables a governar així com el nombre de sensors continguts en el sistema, doncs només caldrà disposar un sensor per a cada variable. A nivell físic, també representarà disposar sensors diferents als que s'utilitzaven en el cas binari (probablement més cars), doncs ara hauran de tenir un abast de captació d'informació molt major.

Cal tenir en compte, però, que en realitat no es tracta d'una modelització contínua en el sentit matemàtic del terme, donat que sempre existirà un cert grau d'aproximació per al pas a valors discrets dels valors dins de l'interval continu de treball. De totes maneres, aquesta situació no suposa un desavantatge a la realitat física, doncs tots els sensors realitzen mesures amb nombres que acaben arrodonint a una certa quantitat de posicions decimals; en les cèl·lules de fabricació reals, no es poden obtenir definicions infinites, ni tampoc són necessàries.

Amb això, la Figura 5.1-2 il·lustra el pas de variables binàries a contínues, per exemple, per a un eix de màquina mitjançant la reducció a una sola variable amb múltiples posicions.

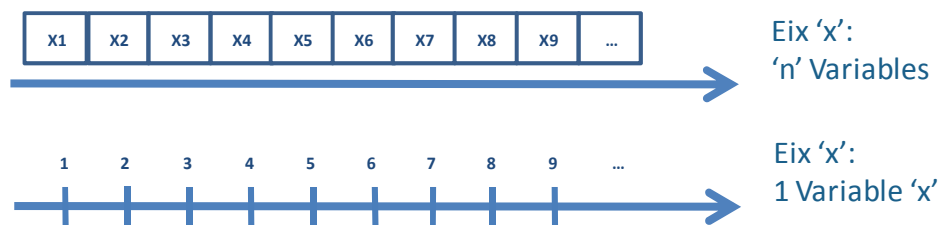


Figura 5.1-2. Un mateix eix de màquina-eina modelat mitjançant amb variables binàries (superior) i variables contínues (inferior).

5.2. Implementació segons *Visual Studio*®

Donat que la implementació de la plataforma d'experimentació "Espai d'Estats" només pretén ser un banc d'assaig dels algorismes presentats, la manera escollida per introduir la modelització de les variables contínues ha estat realitzar-la incorporant un tercer eix cartesià de moviment 'z' al capçal de la hipotètica màquina eina que en el Capítol 4 descrivia trajectòries sobre els eixos 'x' i 'y'.

Per motius de senzillesa en la representació gràfica, en lloc d'adoptar una visualització tridimensional en vista isomètrica per mostrar les trajectòries en els tres eixos cartesianes, s'ha optat per mantenir la vista 2D del taulell i representar l'alçada relativa de la posició del capçal com una projecció azimuthal del valor 'z' segons la direcció normal a aquest. Quan el capçal es

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

troba en la posició d'alçada mínima ($z=0$), el cercle dibuixat a l'espai corresponent de la retícula té el mateix diàmetre que en el cas 2D. Anàlogament, quan el capçal es troba en la posició d'alçada màxima ($z=1$), el cercle dibuixat a l'espai corresponent a la retícula és molt més petit que l'anterior (Veure Figura 5.2-1). Tot i que la vista d'aquesta modelització és bidimensional, en efecte representa la situació en un espai cúbic de tres dimensions.

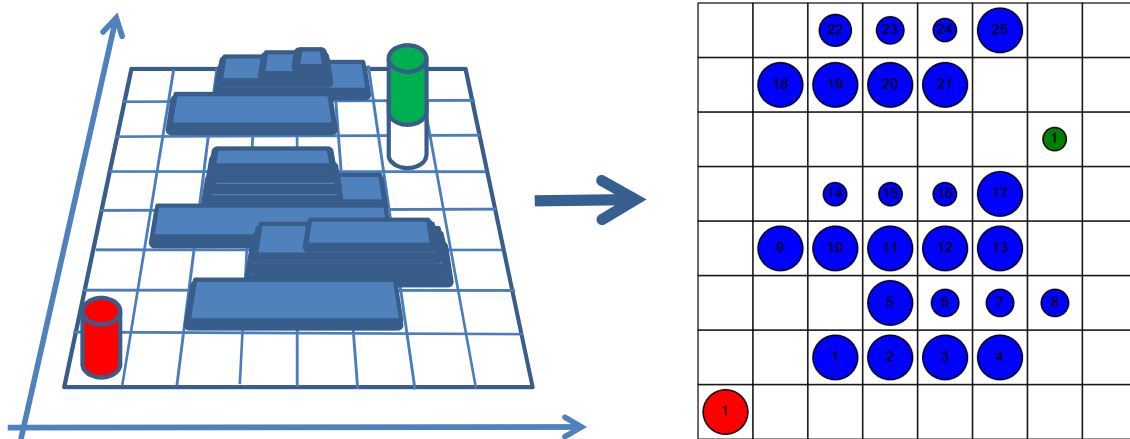


Figura 5.2-1. Situació de Món amb tres eixos cartesianes de moviment i obstacles i representació segons Visual Studio, tot marcant les dues posicions del Capçal: l'Estat Inicial $\{E_0\}$ –en vermell- i Estat Final $\{E_f\}$ –en verd-.

En aquesta nova situació, existeix doncs una nova variable 'z' que pot prendre valors entre '0' i '1' amb una resolució d'un decimal. En el cas del capçal, aquesta variable representa la seva cota inferior mínima. En el cas dels possibles obstacles, aquesta variable representa la seva alçada màxima. D'aquesta manera, donada una especificació d'Estat Inicial $\{E_0\}$ i Estat Final $\{E_f\}$, el sistema no només haurà de trobar un camí practicable, segons les abscondes i ordenades del taulell 2D, sinó que també haurà de tenir en compte l'alçada dels obstacles.

5.3. Definició d'estratègies

Pel que fa a l'especificació dels algorismes realitzada en els Capítols anteriors, en essència, roman invariant. La diferència principal prové, però, en que ara hi ha una nova variable de posició que pot prendre valors entre '0' i '1' amb una resolució d'un decimal (és a dir; pot prendre fins a onze valors diferents: 0; 0,1; 0,2; 0,3,... 1).

D'altra banda, a diferència del que succeïa en el cas 2D, en el cas 3D entren en joc un conjunt de variables que corresponen a l'alçada dels obstacles $\{\vartheta_i\}$. De fet, per a cada obstacle que s'introdueixi en el sistema, serà necessari introduir una variable encarregada de conèixer la seva alçada (Veure apartat 5.4.2). D'aquesta manera, en contraposició del cas analitzat en el Capítol 4 on els obstacles eren tots del mateix tipus, en aquest nou punt, cada obstacle tindrà entitat pròpia diferenciada (degut a l'alçada) i facilitarà escollir de quin tipus d'obstacle es tracta.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Finalment, en relació amb les consignes dels accionaments, caldrà afegir-ne de noves que actuïn sobre la nova variable del sistema. En concret, es pot escollir una quaterna tridimensional, com ara: $\{\alpha_1\}=\{0; 0; 0\}$, $\{\alpha_2\}=\{1; 0; 0\}$, $\{\alpha_3\}=\{0; 1; 0\}$ i $\{\alpha_4\}=\{0; 0; 1\}$, on un dels aspectes més importants és que en el cas de variables contínues cal assegurar que la consigna d'actuació tingui una resolució igual a la definició utilitzada per al pas a nombres discrets (en aquest cas 0,1).

En relació amb les tasques d'experimentació (ja sigui a l'Etapa d'Exploració o bé a l'Etapa d'Execució de Tasques), en el cas 3D caldrà gestionar més informació, relativa a les noves variables (alçada del capçal i dels objectes). Per contraposició, el tractament d'estats i la metodologia per determinar els camins mínims romandrà invariant; doncs l'únic que canviarà serà que existiran molts més estats que anteriorment (un per a cada posició possible de la variable)

5.4. Experimentació. Resultats. Altres funcionalitats

La formalització dels algorismes i la posada en funcionament de la plataforma d'experimentació "Espai d'Estats" posen de manifest diverses qüestions específiques que són abordades en els cinc apartats a continuació.

De manera més extensiva, aspectes com les funcionalitats, premisses de disseny, confecció de Bases de Dades i Bases de Coneixement i abordatge del factor humà; així com casos específics de desenvolupaments d'aplicacions de programari per a sistemes avançats de fabricació desenvolupats a l'entorn de l'objecte de la present Tesi Doctoral poden trobar-se recollits a l'*Annex 3: Programació d'eines dedicades a la Fabricació i a la selecció intel·ligent de sistemes de Fabricació*.

5.4.1. Altres moviments d'actuació. Actuació en sentit contrari a l'habitual

Tal com recull l'apartat 4.4.3, durant la implementació dels diferents models descrits en el cas 2D s'ha adoptat convencionalment la terna d'accionaments $\{\alpha_1\}=\{0,0\}$, $\{\alpha_2\}=\{1,0\}$ i $\{\alpha_3\}=\{0,1\}$. De totes maneres, aquesta possibilitat no és la única i més enllà de fer canvis en aquestes tres senyals de consigna, se'n poden obtenir combinacions lineals derivades per tal d'implementar altres estratègies de moviment. Així doncs, també es poden implementar consignes com ara $\{\alpha_5\}=\{1,1\}$ (moviment de l'alfil en els escacs), $\{\alpha_6\}=\{2,3\}$ i $\{\alpha_7\}=\{3,2\}$ (moviments del cavall en els escacs).

La possibilitat de poder introduir senyals d'accionament que siguin combinacions lineals d'altres implica que podran existir diferents maneres (diferents jocs de consignes d'actuació) per tal de resoldre una mateixa tasca encomanada. Per aquest motiu és molt important poder discriminar correctament quin és el cost de cada solució i així poder escollir la solució òptima.

Finalment, també per una qüestió de senzillesa en la implementació, per a la construcció i assaig de mons senzills només s'ha tingut en compte l'actuació segons el sentit creixent dels eixos d'actuació. Malgrat això, l'actuació en sentit contrari és perfectament introduïble a

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

“Espai d’Estats”, si bé cal utilitzar noves consignes per als accionaments (per exemple utilitzant una consigna com $\{\alpha_g\}=\{-1,0\}$).

Donat que aquestes noves consignes també són combinació lineal de les anteriors, de nou, en molts sistemes existiran diferents maneres de resoldre la mateixa situació i per tant caldrà fer atenció al cost de cadascuna d’elles.

5.4.2. Tractament d’Obstacles: fixos, mòbils o eliminables

En la primera aproximació realitzada amb variables binàries sobre un taulell 2D, a “Espai d’Estats” els obstacles $\{\vartheta_i\}$ són elements fixos i immòbils en la retícula i reben el tractament de fronteres. Un cop s’afegeix la tercera dimensió, els obstacles són franquejables ja que poden ser superats tot alçant el capçal de la màquina-eina. De totes maneres, els obstacles són una part fonamental de la modelització i poden ser explotats d’una manera més àmplia.

En el cas d’una màquina que treballi dipositant material, per exemple, per realitzar petites aportacions de material metàl·lic en una peça que tingui defectes superficials (cas de les màquines dedicades al “*laser cladding*”, o sistemes d’aportació metàl·lica) pot ser interessant mantenir la modelització inicial amb objectes inamovibles.

Per una altra banda, però, en el cas de les topologies de màquina dedicades a operacions de muntatge de components, pot ser molt més convenient modificar el tractament dels obstacles per tal de fer-los mòbils. En efecte, pot interessar poder desplaçar elements sobre el taulell de manera individual o fins i tot desplaçar elements (obstacles) tot utilitzant-los per empènyer altres obstacles.

Finalment, es troba el cas de les màquines-eina utilitzades per a la sostracció de material (per exemple mecanització per arrencament d’encenalls), on en realitat el que interessa és trobar material per poder eliminar-lo.

Una implicació important d’aquestes qüestions per a la modelització dels sistemes amb els algorismes presentats té a veure amb els costos de la Execució de Tasques. De manera general, es pot adaptar el model de costos associant un cost específic al desplaçament de cadascun dels objectes $\{\rho_{\vartheta_i}\}$ de manera que en el cas d’arrossegament d’un segon objecte $\{\vartheta_2\}$ a partir del moviment del primer $\{\vartheta_1\}$, els costos específics dels obstacles involucrats se sumin tot fent augmentar el cost de la operació.

Aquesta mateixa especificació de costos pot ser utilitzada en el cas de l’arrencament d’encenalls, tot i que en aquest cas es tracta només d’un cost que s’haurà d’assumir una vegada durant el canvi d’estat, ja que en tractar-se d’una situació no reversible, l’objecte desapareixerà $\{\vartheta_i\}$ i el cost ja no serà pertinent per a etapes posteriors.

A més d’aquestes consideracions, cal tenir en compte que en alguns dels casos de topologies de màquina dedicades al muntatge de components i en tots els casos de les màquines-eina dedicades a l’arrencament d’encenalls, es tindran situacions no reversibles, on el món canviarà a estats diferents des dels quals no es podrà tornar a certs estats anteriors. Per aquest motiu, en aquests casos serà recomanable construir el Model del Món inicial d’una manera no

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

destructiva i deixar per a l'Etapa d'Execució de Tasques les accions concretes que puguin implicar no reversibilitat.

Curiosament, en els casos en que intervinguin situacions no reversibles, el Model del Món al final $[\Omega_n]$ haurà d'evolucionar necessàriament des del Model Inicial $[\Omega_1]$ ja que en particular, hauran aparegut nous estats possibles però alhora algun dels estats hauran deixat de ser assolibles $[\xi]$ després de l'execució de tasques.

5.4.3. Tractament de la connexió entre punts de la retícula 2D. Fronteres i "Forats de cuc"

Com s'ha comentat en el Capítol 4, els sistemes reals contenen fronteres que corresponen als extrems del rang d'utilització dels diferents elements mòbils. El tractament de les fronteres a "Espai d'Estats" és molt senzill, doncs simplement suposen una barrera infranquejable a través de la qual no es pot fer cap canvi d'estat. En els models presentats més senzills i especialment en aquells de dimensions reduïdes, no s'han habilitat les fronteres amb la intenció de simplificar el tractament numèric (més concretament, per no tenir una majoria de resultats nuls en l'aplicació de les consignes de sortida $\{\alpha_i\}$). Malgrat això, en els models més grans, les fronteres sí que poden ser habilitades, tot confonent-se el seu efecte amb el dels obstacles immòbils.

Tenint en compte, però, que l'ordenació dels espais en la retícula 2D és convencional, en un sistema físic real seria relativament senzill canviar el cablejat de senyals de cada posició i per tant d'introduir en el sistema la possibilitat de fer salts a través de "forats de cuc" entre diferents posicions no necessàriament contigües.

Dit d'altra manera, la representació en l'espai 2D representat fa coincidir dues realitats separades: els Estats $[E_i]$ i les consignes de sortida cap als accionaments $\{\alpha_i\}$. Només variant les connexions entre els espais de la retícula, es podria obtenir una nova ordenació dels Estats totalment diferent (s'estaria canviant l'ordre dels espais de la retícula), que podria donar lloc a una Tupla $[\psi]$ totalment diferent.

Aquest arranjamant és el que es mostra a les Figura 5.4.1, on es proposa un canvi en la situació dels sensors de posició (per tant, els Estats $[E_i]$ canvien de posició física a l'espai), mentre es manté l'especificació de les consignes de sortida $\{\alpha_i\}$. Aquests "canvis de cablejat", on per exemple el sensor de la posició 'D' passa a ser en el lloc físic on prèviament hi havia el sensor de la posició 'E', no suposen cap problema per a l'execució dels algorismes presentats, ja que com s'ha comentat, els sensors i les consignes de treball es troben desacoblades en el funcionament d'aquest.

Si bé el model del món generat seria diferent (per exemple, l'aplicació de la consigna $\{\alpha_2\}$ ja no porta de la casella 'A' a la casella 'B' de la retícula sinó que condueix a la casella 'I'), a priori, en el Model del Món no hi ha com a llei escrita que l'arranjament de les caselles hagi de ser el de la figura de l'esquerra i per tant està obert a incorporar les funcions de canvi d'estat que es corresponguin amb el funcionament real en cada moment.

D'acord amb això, un altre punt important a tenir en compte és la possibilitat d'aplicació de prejudicis que ha estat presentada a l'Apartat 4.5.3. i en concret als *Prejudicis d'Abstracció per Analogia*. De fet, donada la codificació dels Estats com a vectors que contenen les senyals

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

rebudes pels sensors i no com a vectors de posició del sensor concret que presenta la posició del capçal i que duria implícita una especificació de coordenades a l'espai (per exemple en eixos cartesianes), l'Abstracció per Analogia es pot aplicar a qualsevol arranjament d'Estats en una retícula i per tant tampoc suposa un problema en cas de canvi de situació de les caselles ni tampoc en el cas general en que els espais no es trobin connectats físicament en el cas real.

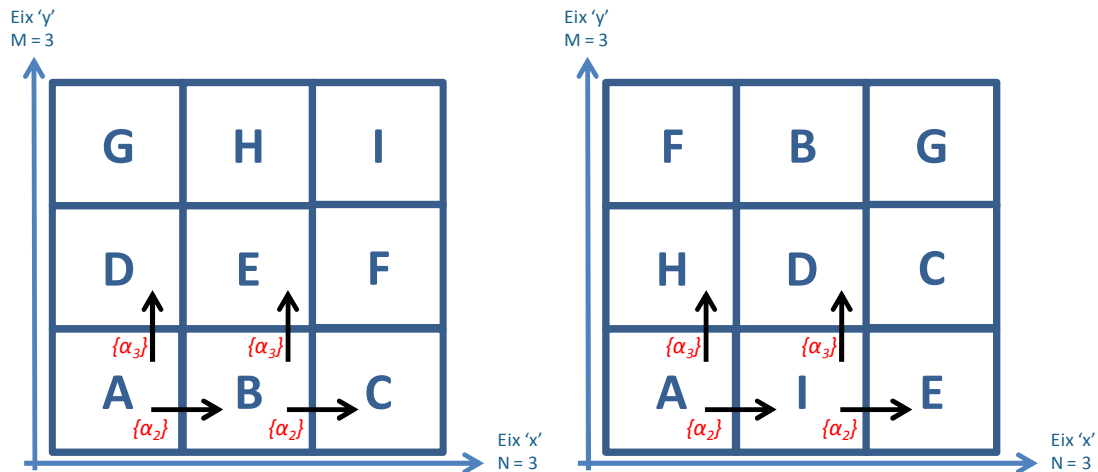


Figura 5.4-1. Esquerra: Situació inicial amb retícula $N \times M$ i Consignes d'Accionament $\{\alpha_2\}=\{1,0\}$ i $\{\alpha_3\}=\{0,1\}$. Dreta: Canvis en l'arranjament de la ubicació dels Sensors mentre es manté l'especificació de les senyals d'accionament.

D'altra banda, variant el tipus de consignes dels accionaments, també es generaria un comportament del món distint, que seria plenament compatible amb la utilització dels algorismes descrits. Fent, per exemple, $\{\alpha_2\}=\{-1,-1\}$ i $\{\alpha_3\}=\{1,-1\}$ en lloc dels inicials $\{\alpha_2\}=\{1,0\}$ i $\{\alpha_3\}=\{0,1\}$ es generaria una connexió entre caselles que es troba representada a la Figura 5.4-2.

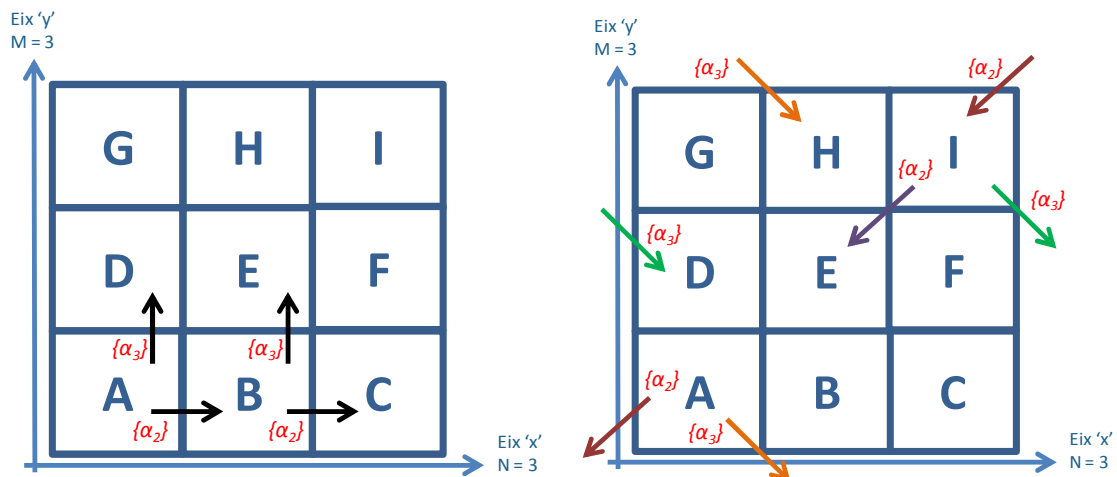


Figura 5.4-2. Esquerra: Situació inicial amb retícula $N \times M$ i Consignes d'Accionament $\{\alpha_2\}=\{1,0\}$ i $\{\alpha_3\}=\{0,1\}$. Dreta: Canvis en l'especificació de les consignes d'accionament $\{\alpha_2\}=\{-1,-1\}$ i $\{\alpha_3\}=\{1,-1\}$, mentre es manté l'especificació de les caselles de la retícula.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Tal com s'ha descrit al principi del present apartat, la modificació de l'arranjament dels sensors en les caselles de la taula o la modificació de les consignes d'actuació del sistema són canvis que no afecten al funcionament donat que es tracta d'informacions desacoblades en el funcionament dels algorismes. Com a curiositat, els dos canvis que s'han mostrat com a exemple en les figures 5.4-1 i 5.4-2 han estat triats de forma que tot i tractar-se de diferents variacions del Món inicial, puguin crear Models del Món comuns, tal com es mostra a la Figura 5.4-3.

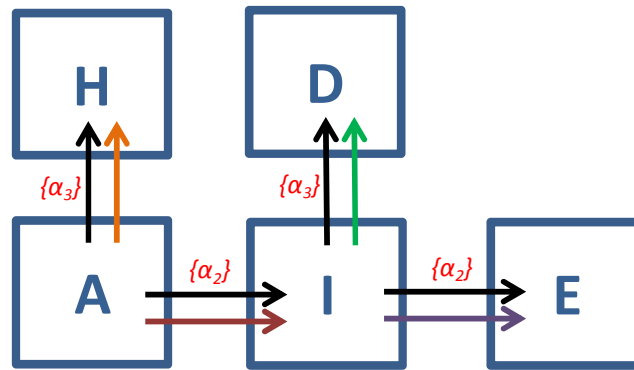


Figura 5.4-3. Nova interconnexió d'Espais fruit de qualsevol dels dos canvis presentats: Canvis en la ubicació dels Sensors o canvis en les consignes d'accionament.

5.4.4. Accionaments no controlats però amb influència sobre el sistema

Un darrer aspecte no contemplat en l'aplicació "Espai d'Estats" desenvolupada és l'existència d'elements no controlats directament pels sensors del sistema però amb influència sobre aquest i per tant rellevants en la construcció i gestió de Models del Món. Aquests tipus d'objectes, ja descrits al primer Corol·lari postulat sobre el model de Gomà i Vivancos, són possibles objectes que escapen del control del propi sistema, anomenats "*objectes ocults*" o altrament "*accionaments no controlats*".

En la implementació física d'arquitectures de fabricació aquest tipus d'elements només haurien de ser producte de fets inesperats o funcionaments inadequats d'alguna part de la cèl·lula de fabricació; donat que en la integració informàtica hi hauria d'haver evidències de tots els elements actius i de la seva col·laboració. No obstant, aquest fet és possible que succeeixi en el cas que a l'entorn de treball hi hagi també operaris humans –capaços de realitzar tasques sense deixar traces al sistema- o bé en el cas que la quantitat de sensors en el sistema fos relativament baix.

En cas que això succeís, es podrien donar casos d'indefinió en el Model del Món generat per l'algorisme de Gomà i Vivancos que haurien de tractar-se a base d'introduir nous sensors per detectar "*Estats Ocults*" [ξ] i nous accionaments per modelitzar "*accionaments no controlats*" [α]. Aquests nous objectes i accionaments s'hauran d'introduir a través de prejudicis dins els Models del Món per tal de generar un model del món prou complet per tal d'explicar totes les combinacions d'entrades i sortides del sistema.

Capítol 6. Extensió a topologies diverses de Màquines i Cèl·lules de Fabricació Flexible

6.1. Formes de Programació i Aprenentatge Automàtic. Requisits de Funcionament i Requisits Industrials

Tornant als conceptes de Fabricació Àgil revisats al Capítol 2 i al tractament dels sistemes de fabricació ràpida comentats, queda palesa la importància atorgada a la capacitat d'aquest tipus de sistemes per donar una resposta veloç a les necessitats productives (àmbits de "Resposta Ràpida" i "Adaptabilitat"). Ara bé, en aquest cas no es tractarà només d'assegurar que els sistemes utilitzats tinguin un temps de posada en marxa i escalat de producció molt curt per tal de posar-los a produir correctament (en anglès conegut com fases de "*set-up*" i "*ramp-up*") sinó que a més també caldrà que el temps de fi de cicle i de tancament de la producció siguin també molt reduïts per tal de deixar llest el sistema per a poder abordar el següent lot de fabricació amb gran rapidesa.

Totes aquestes funcionalitats són demandes explícites que provenen de necessitats específiques de mercat i imposen forts requeriments als processos productius (Veure Annex 4: Fabricació en massa de béns personalitzats. Fabricació Poc Convencional). Per aquest motiu, cal implementar el desenvolupament dels productes i els processos associats com a parts d'un sol tot, d'una manera "sencera", des de la formalització de la primera idea fins al final de vida útil de producció i de producte; el qual en anglès s'anomena adoptar un "*holistic approach*".

La programació de la majoria de sistemes de producció com ara robots, màquines-eina o sistemes de fabricació flexible integrats per diferents equips de procés, es basa en una programació exhaustiva per part de l'usuari –també anomenada *programació textual* o en alguns casos *textual-assistida* si es compta amb ajut per part de la interfície de programació– que dóna lloc a un llistat tancat de comandes que posteriorment s'executa en el mitjà productiu escollit. Moltes vegades, amb l'objectiu de maximitzar l'eficiència de l'equip productiu i per tant de reduir al mínim possible els temps d'aturada dels equips, la programació dels sistemes es realitza en mode "*off-line*"; és a dir *fora de línia*, en estacions dedicades de CAM (de l'anglès "*Computer Aided Manufacturing*") preparades bàsicament per a la programació de les trajectòries per a cadascun dels eixos així com de la resta de variables del sistema.

La programació textual o textual-assistida sol ser llegible i fàcilment interpretable -en la mesura que el programador hagi realitzat un text ben documentat- i permet fàcilment la simulació gràfica així com l'edició i modificació d'extensió del programa. A més, dóna una imatge molt clara de l'objecte de les operacions que conté el programa doncs s'hi solen explicitar tres nivells diferents de comandament: (i) Nivell Tasca (o alt nivell), (ii) Nivell Objecte (nivell intermedi amb especificació de subtasques) i (iii) Nivell màquina (baix nivell amb accions concretes). No obstant, es tracta d'una programació llarga, tediosa i que com és evident necessita especificar de manera explícita tots els punts de treball, trajectòries i accions que seran necessàries de realitzar durant l'execució del programa.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Un cop duta a terme la programació pertinent, avui en dia és habitual comptar amb mitjans productius que incorporen sistemes de llaç tancat equipats amb gran quantitat de sensors. Aquests sensors són capaços de discernir la posició o la velocitat de moviment dels diferents elements mòbils –que habitualment es realitza mitjançant el mostreig en posicions de referència com per exemple els codificadors rotatius (en anglès “*rotary encoders*”); és a dir, convertint en coordenades discretes la situació dels diferents elements mòbils de manera contínua-. Però a més, molts cops també incorporen sensors i detectors per recollir informació sobre les forces i parells exercits en les diferents direccions.

En resum, la majoria d'arquitectures de fabricació disposen de dos equips de programació i control entre els quals es reparteix la programació:

- i) un equip de procés extern que manipula dades i que gestiona variables del procés i
- ii) un programa del propi sistema de fabricació que executa les comandes encomanades a partir de dades, senyals i objectes externs i que només utilitza els sensors de llaç tancat dels que disposa per corroborar que el programa s'està desenvolupant adequadament.

Per tal d'aconseguir un mode de programació més senzill i intuïtiu que la programació textual i aprofitant els sensors introduïts en les diferents topologies de mitjans productius, sobretot en el camp dels robots s'han anat desenvolupat aplicacions de suport capaces d'enregistrar les operacions obtingudes per guiatge humà en format “*trajectòria*” (amb multitud de punts de pas obtinguts amb gran resolució) o bé “*punt a punt*” (només tenint en compte determinades posicions definides per l'usuari i deixant llibertat al sistema per escollir la millor estratègia per a la realització dels moviments intermedis).

Aquest tipus d'aplicacions, poc o gens implementades en el món de les màquines-eina, també suporten la realització de dites trajectòries en maquetes a escala reduïda i de cost menor per tal de no interrompre el sistema productiu en el sí de les tasques de fabricació. La programació per guiat és senzilla de realitzar i no necessita que l'operari tingui coneixements específics de programació. Malgrat això, la naturalesa de la realització de les tasques de guiat genera programes complexos i difícils d'interpretar, el qual en complica molt la modificació, depuració i millora i en molts casos no és ni útil ni pràctica per programar tasques complexes que poden resultar difícils o quasi impossibles de reproduir amb mitjans humans.

Per altra banda, les màquines són molt millors que els humans en tasques d'experimentació. Són exhaustives per naturalesa i tenen una millor capacitat per realitzar operacions matemàtiques i per tant per detectar patrons de comportament. Aquests motius són els que posen de manifest que en realitat les màquines són les candidates ideals per realitzar la seva pròpia programació a partir de sistemes d'Aprenentatge Automàtic.

En efecte, es dona la paradoxa que en el món de la fabricació, es pretén que els sistemes automàtics donin resposta a totes les eventualitats que puguin succeir però es deixa que la capacitat de resposta recaigui en el fet que tota la casuística possible hagi estat programada prèviament. Però en molts casos, no és possible poder preveure *a priori* totes les situacions i anomalies que puguin arribar a succeir i per tant la possibilitat d'introduir sistemes intel·ligents que siguin capaços d'adaptar-se en el control de sistemes productius és molt interessant i obre un ventall molt gran de possibilitats.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

A efectes de la present Tesi Doctoral i per tal d'incorporar els algorismes que s'han descrit en els capítols anteriors, en particular, aquests sistemes intel·ligents implementats hauran de ser capaços *d'observar el món, d'experimentar en ell per resoldre problemes, d'aprendre les lleis que governen el lloc on habita i sobretot d'aprendre dels errors* provocats en experiències fallides. No en va, la majoria d'aplicacions de sistemes intel·ligents es realitzen per a la resolució de tasques problemàtiques i en concret per aconseguir programes que no s'hagin de tornar a programar constantment.

Contràriament al que la majoria pugui pensar, aquests sistemes d'aprenentatge automàtic no intenten modelitzar els processos d'aprenentatge humà, sinó que la realitat pràctica revela que més aviat s'implementen en tasques difícils de realitzar i programar (en aplicacions com les de reconeixement d'imatge i/o so), en tasques que requereixin aplicacions autoadaptables (filtres, interfícies intel·ligents) o en casos de mineria de dades (anàlisis intel·ligent de dades), que difícilment serien encomanades a agents humans.

Entre tota la taxonomia de tipus d'aprenentatge emprats per diferents tipus de sistemes d'aprenentatge automàtic [80], els models i algorismes desenvolupats en el marc de la Present Tesi Doctoral responen a aprenentatge de *tipus deductiu* (cerca d'informació en base a l'experimentació) que es complementa amb aprenentatge de *tipus inductiu* (generalització de conceptes a partir de l'aplicació de prejudicis).

La utilització d'algorismes de tipus deductiu té l'avantatge de facilitar el coneixement mitjançant mecanismes ben definits (fonamentats en la lògica matemàtica) i per tant permet construir els Models del Món $[\Omega]$ d'una manera successiva i coherent. Malgrat això, com s'ha vist, necessita experimentar per conèixer i per tant només aflora en els models aquell coneixement descobert explícitament. D'altra banda, la introducció de prejudicis en l'etapa d'execució de tasques (Veure Capítol 4) permet desplegar tècniques d'aprenentatge inductiu que possibilita la obtenció de conclusions i coneixement sobre parts del món no explorades. Com es veu però, el coneixement obtingut d'aquesta manera no sempre és correcte i per tant cal assegurar bé el coneixement proposat pel sistema abans d'incorporar-lo dins un nou Model del Món vàlid.

6.1.2. Requisits de Programació en Arquitectures Àgils de Fabricació

Les tres possibilitats de programació que s'han comentat a l'apartat anterior (programació *textual*, programació *per guiat* i programació *autònoma mitjançant l'aprenentatge automàtic*) presenten diferents avantatges i inconvenients posades de manifest en cadascun d'aquests casos. En qualsevol cas, independentment del mètode escollit, la programació en Arquitectures Àgils de Fabricació haurà d'acomplir una sèrie de requisits que provenen de les dues vessants que es recullen a continuació i que deriven de la seva condició:

- **Requisits genèrics exigits a qualsevol solució de programari desenvolupada:** Aquells que es demanarien a qualsevol estructura de codi, com ara: Integritat d'Estructura, Extensibilitat, Facilitat de millora, Eficiència o Naturalitat
- **Requisits específics propis d'implementacions realitzades amb Arquitectures Àgils de Fabricació (siguin robots o altres tipus d'arquitectures):** Aquells que són necessaris

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

per assegurar l'acompliment de les tasques encomanades, com ara la Capacitat de sincronització amb els elements externs (entrades i sortides), així com d'interactuar-hi adequadament, la Capacitat per realitzar tasques multiprocés (multitasques), la Capacitat per prendre decisions i específicament per al cas desenvolupat, la Capacitat de realitzar Models del Món.

El correcte assoliment dels requisits imposats per ambdues vessants serà el que determini la capacitat de treball d'un sistema productiu concret.

D'altra banda, de manera general, les premisses de disseny d'aplicacions i altres aspectes com la influència del factor humà es troben recollits a l'Annex 3 (Programació d'eines dedicades a la Fabricació i a la selecció intel·ligent de sistemes de Fabricació) per al cas particular del programari "Espai d'Estats". Malgrat que aquest programa és en sí una plataforma d'experimentació, donada l'ambició a estendre el seu funcionament a la implementació en Arquitectures Àgils de Fabricació, els punts tractats en l'Annex ressenyat són rellevants tant per a la programació de plataformes d'experimentació d'algoritmes com per al desenvolupament de programes de control per a sistemes productius.

6.1.3. Requisits Industrials dels sistemes de Fabricació Intel·ligent

A banda dels requisits imposats per la pròpia naturalesa i funcionament dels sistemes, cal tenir en compte les necessitats imposades des de la banda industrial, que en el fons són les que lliguen les implicacions de disseny amb la materialització de les expectatives dels usuaris d'aquestes Arquitectures Àgils de Fabricació. En aquest sentit, aprofitant el marc proporcionat pel concepte en alça de la "Fàbrica Llista" (de anglès "Smart Factory"), els usuaris de les línies de producció volen cada cop més que es pugui fer un ús intensiu de les tecnologies de la fabricació Digital i Virtual.

Aquests tipus de requisits, molt influïts per les exigències de producte del client final, poden ser aglutinats en els dos tipus que es recullen a continuació:

- **Requisits de gestió de la informació (sensors i accés) per a la presa de decisions:** Aquells que afecten a la detecció, accés, transmissió, traçabilitat i el maneig de la informació general. En els darrers temps, l'aparició de dispositius intel·ligents de baix cost per a l'ús personal (telèfons, tauletes, etc.) ha obert la porta a les possibilitats –i també als reptes derivats- en matèria d'Ubiquïtat, Interoperabilitat i Adaptabilitat de formats, les quals són també exigibles aigües amunt en el control i supervisió de processos industrials. Per aconseguir aquesta informació a alt nivell (presa de decisions), cal tenir resolta la etapa de recollida d'informació, que ha de ser automàtica i en temps real.
- **Requisits exigits per a una alta confiança i un baix nivell de fallides:** En definitiva, aquells que són necessaris per poder tenir una productivitat elevada, com ara: repetibilitat, control de qualitat dins el propi procés, capacitat de maniobra front a esdeveniments inesperats, per tant, aquells que contribueixen a la robustesa i confiabilitat d'un sistema productiu.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Aquests requisits van ser identificats i recollits en la iniciativa del grup de treball *Connect-EU* de "Factories del Futur" en la que es va realitzar una extensa activitat de prospectiva durant els anys 2010-2011 amb el suport de l'Agència ACCIÓ –l'Agència de la Competitivitat de l'Empresa Catalana- (veure Figura 6.1-1 a continuació). La versió completa de l'estudi (configurat en format d'Agenda Estratègica) també inclou aspectes relatius a la Sostenibilitat dels Processos de Fabricació, la Fabricació d'Alt Rendiment i l'Ús Eficient de Matèries Primeres i es pot consultar a la plana web del grup de treball.



Figura 6.1-1. Esquerra: Jornada d'activitat d'implicació industrial i prospectiva en el Marc del Grup de treball Connect-EU, el 11/05/2011 a la Fundació CIM. Dreta: Portada de l'Agenda Estratègica de Fabricació per al Sector Manufacturer a Catalunya.

D'altra banda, de manera general, les premisses de disseny d'aplicacions industrials amb els seus aspectes positius i oportunitats de millora es troben recollides amb detall a l'Annex 4 (Fabricació en massa de béns personalitzats. Fabricació Poc Convencional) i en concret a l'apartat A4.1. Fabricació del Segle XXI: Principals reptes i oportunitats. Malgrat que no tots els productes es produeixen actualment amb Arquitectures Àgils de Fabricació, en aquest Annex s'hi recull el treball realitzat en sectors de productes concrets que es consideren representatius i on hi seria rellevant la implementació de sistemes com els desenvolupats en el marc del present treball.

6.2. Màquines-Eina per a la Fabricació mitjançant l'arrencament d'encenalls (Fabricació Sostractiva) i Sistemes de Deposició de Material (Fabricació Additiva)

Els sistemes de fabricació utilitzats a la indústria, siguin per a la sostracció o aportació de material, basen el seu funcionament en la execució de tasques gràcies a la realització de moviments per part dels diferents eixos i altres elements mòbils que són capaços de controlar. Així doncs, la taxonomia de màquines les caracteritza segons el nombre i la disposició dels moviments controlats, que en essència és el que descriu la seva arquitectura concreta.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

La teoria lògica desenvolupada en la present Tesi Doctoral pot ser aplicada a totes les arquitectures diferents de màquina -siguin per a l'arrencament d'encenalls o per a la deposició de material-, donat que en tots els casos es pot fer una abstracció en variables binàries o contínues per als diferents elements mòbils continguts en dites màquines. Per exemple, un centre de mecanització de cinc eixos i canvi automàtic d'eines podria ser descrit amb un conjunt de variables contínues (els cinc eixos mòbils principals) i certes variables binàries (per exemple el carrusel de canvi d'eina) (Veure Figura 6.2-1).

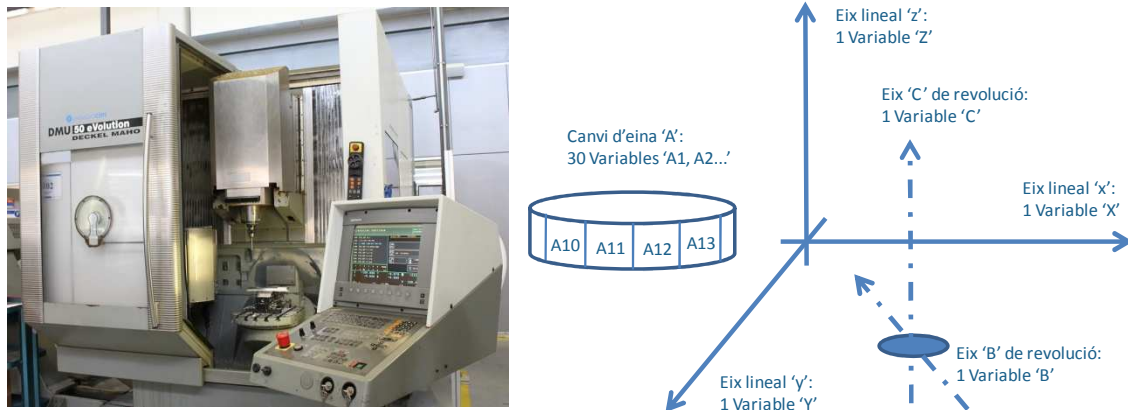


Figura 6.2-1. Esquerra: Centre de Mecanització de 5 eixos i alta velocitat *Deckel Maho DMU 50 evolution*. Font: Fundació CIM. Dreta: Especificació en variables contínues dels eixos mòbils disponibles a la màquina ('X', 'Y', 'Z', 'B' i 'C') i en variables binàries del canvi d'eina ('A').

Malgrat això, el cert és que les topologies de màquines-eina (que en el mode de funcionament normal disposen d'eines de tall al capçal per tal de realitzar l'arrencament de material) requereixen un tractament específic per a la materialització de sistemes de control basats en algorismes com els desenvolupats en el marc del present treball. En efecte, donat que el capçal de treball està equipat amb una eina que va canviant amb el desenvolupament de les diferents operacions (passades de desbast, passades d'acabat) i que disposa de capacitat de tall, cal assegurar que aquestes eines no afectaran al món durant l'Etapa d'Exploració (en concret, que no afectaran a la peça i tot allò que es pugui trobar a l'espai de treball de la màquina). Per tant, per realitzar l'Etapa d'Exploració del Món, s'haurà de fer un canvi d'eina i utilitzar-ne un que no tingui capacitat destructiva sinó només de test (com ara un palpador).

D'altra banda, també caldrà tenir en compte que algunes geometries interiors podrien ser només abastables un cop la sostracció de material hagués començat, el que complicaria molt la construcció de Models del Món nous i la posterior ampliació d'aquests

En contraposició, es tenen els sistemes de fabricació per aportació de material per capes, alguns de les quals, donat el seu tipus de procés i arquitectura, són ideals per a la implementació dels algorismes desenvolupats.

En efecte, el concepte de la impressió 3D (fabricació additiva per capes) inclou un ampli ventall de tecnologies que serveixen per materialitzar productes a partir de l'aportació de matèria prima de maneres molt variades. A nivell d'arquitectura, algunes de les màquines d'impressió en 3D utilitzen una plataforma de construcció en forma de cubeta que es troba plena de

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

material en tot moment fins a la cota de construcció. Altrament, es troben les arquitectures de Fabricació Additiva que només dipositen material en els llocs on hi ha d'haver peça i deixen lliure la resta del volum útil de construcció.

Les màquines del primer cas són per exemple les que implementen tecnologies com el *Sinteritzat Selectiu per Làser* (SLS, de l'anglès "*Selective Laser Sintering*") o la *Estereolitografia* (SLA, de l'anglès "*Stereolithography*") en el cas dels plàstics o bé la *Fusió Selectiva per Làser* (SLM, de l'anglès "*Selective Laser Melting*"). Aquestes tecnologies, també anomenades com a tecnologies de Fabricació Additiva "Fotònica", basen el seu funcionament en la utilització d'un feix de llum (normalment làser) per polimeritzar o fondre el material de partida en els punts que formaran part de les peces finals. En aquests tipus de màquina, donat que en realitat no existeix un capçal com en el cas de les màquines-eina sinó que la eina utilitzada és un feix de llum, l'aplicació dels algorismes especificats en la present Tesi Doctoral caldria utilitzar-la sobre el sistema de miralls mòbils que condueixen la llum i sobre la resta d'elements mòbils (anivellador, plataforma) que componen la topologia d'aquest tipus de màquines.

D'altra banda, les màquines del segon cas són aquelles en les que sí que existeix un capçal mòbil que és el que condueix el material d'aportació als llocs concrets on cal construir geometries que pertanyin a la peça final i als seus suports en cas que siguin necessaris. Les tecnologies específiques d'aquestes topologies de màquines són per exemple la *Deposició de Fil Fos* (FDM, de l'anglès "*Fused Deposition Modelling*") en el cas de plàstics, la impressió de tinta aglomerant sobre un llit de material (típic de les màquines "*Object*") en el cas ceràmic o fins i tot la deposició de material metàl·lic com és el cas de l'anomenat "*Laser Cladding*" mitjançant, per exemple, soldadura de Tungstè (TWAM, de l'anglès "*Tungsten Welding Additive Manufacturing*").

Aquest segon grup de màquines és particularment favorable per a l'aplicació dels algorismes desenvolupats per a la implementació d'Arquitectures Àgils de Fabricació per diferents motius.

En primer lloc, la topologia del segon tipus de màquina hi ajuda enormement, doncs es tracta d'estructures clares i no redundants (normalment tres eixos lineals en les direccions cartesianes i un eix de rotació per al control del material d'aportació). En segon lloc, el capçal de l'eina no es varia durant la producció, si bé es pot actuar amb dos capçals independents de manera seqüencial; el qual és pot implementar fàcilment. Això fa que no s'hagi de separar les etapes *d'Exploració del Món* i *d'Execució de Tasques* per terminals de capçals diferents i que per tant, que l'*Etapa d'Execució de Tasques* es pugui dur a terme de manera apropiada. En tercer lloc, el capçal no porta una eina amb possibilitat de destruir la peça construïda (com a molt pot portar un capçal tèrmic però que es pot protegir al contacte) i seria relativament senzill d'afegir-hi sensors de força o de tipus palpador per tal de tenir més informació per construir Models del Món.

A la Figura 6.2-2 es pot veure una materialització d'una màquina de Fabricació Additiva per deposició de fil de plàstic desenvolupada sobre una arquitectura de 3 eixos cartesianes que originalment havia estat dissenyada per a la impressió de cera pel fabricant "*3D Systems*" (Màquina *Thermojet*®). L'especificació dels eixos de la màquina en variables necessàries per a la implementació dels algorismes presentats s'aborda a l'apartat a continuació.



Figura 6.2-2. Esquerra: Bancada d'impresora 3D de cera durant el procés de desmuntatge de components. Dreta: Màquina de Fabricació Additiva per deposició de fil de plàstic desenvolupada ja integrada sobre l'arquitectura de 3 eixos cartesianes.

6.2.1. Materialitzacions a l'entorn de la Tesi Doctoral

La primera materialització d'una màquina per a la fabricació additiva de fil plàstic a l'entorn de la present Tesi Doctoral va ser realitzada el juny de l'any 2010 i va consistir en la posada en marxa d'un equip de Fabricació Additiva mitjançant la tecnologia de deposició de filament plàstic tipus FDM.

L'arquitectura de la màquina en qüestió (presentada a la Figura 6.2-3) consistia en aprofitar els tres eixos cartesianes del moviment d'una màquina d'impressió 3D de cera (eixos 'Y' i 'Z' a la taula i 'X' en el capçal), tot substituint el capçal original i el dipòsit de cera per un capçal i bobina de material plàstic accionat per un eix de rotació controlat (eix 'B'). Altrament, el lit de la plataforma de construcció permetia tenir una temperatura controlada per quatre resistències en creu que suposaven al seu torn una altra variable binària de funcionament: 'T' (Veure Figura 6.2-3).

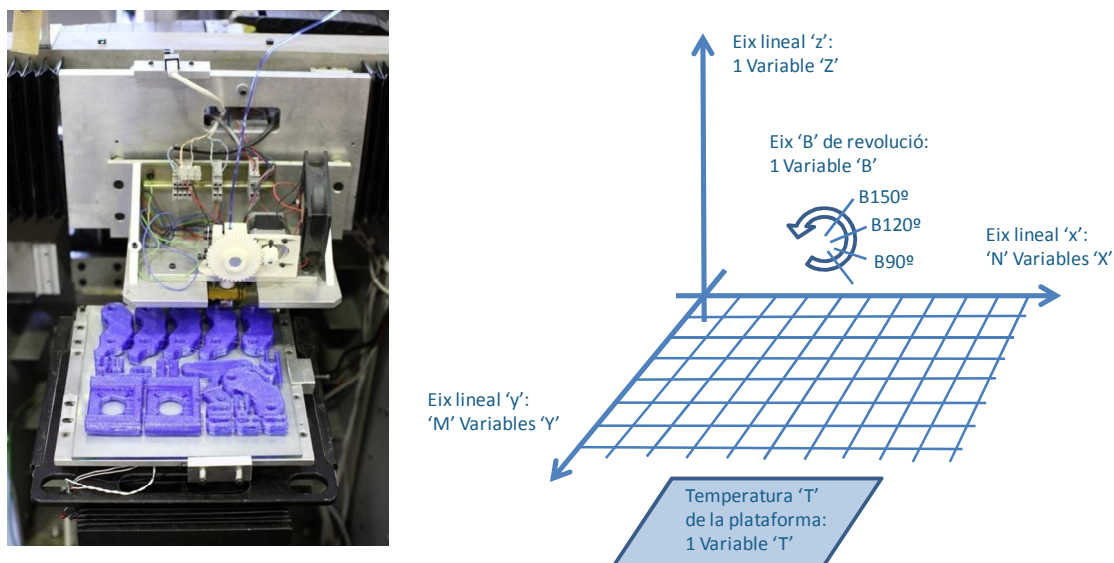


Figura 6.2-3. Esquerra: Màquina de Fabricació Additiva per deposició de fil de plàstic. Dreta: Especificació de les consignes d'actuació la màquina en variables binàries i contínues.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

En efecte, aquesta primera màquina, que es controlava mitjançant el programari lliure anomenat "Match3", va suposar una fita important doncs va permetre posar en marxa un equip de fabricació capaç de arribar a fabricar peces completes. Més concretament, a nivell físic, la posada en marxa d'aquest equip va permetre comprendre en profunditat com es comportaven aquests equips i per exemple va permetre relaxar en molt els requeriments exigits a l'estructura de les màquines posteriors; passant de fosa d'alumini a estructures de barres roscades (en els models més senzills) o de perfils d'alumini (per als models més exigents).

Des del punt de vista de la programació de Tasques, una topologia de 5 variables és de per sí una tasca complicada i que s'ha de realitzar amb l'ajut dels sistemes CAM ja ressenyats anteriorment. Pel que respecta a la construcció de Models del Món, també suposa un repte important, doncs es tracta d'una exploració d'una Món amb 5 variables diferents (3 de binàries: 'X', 'Y' i 'T' i 2 de contínues: 'Z' i 'B').

A més, en els darrers anys s'ha pogut anar una mica més enllà i s'han anat afegint petits accessoris de millora com els presentats a la Figura 6.2-4. Cadascun d'aquests accessoris afegeix noves variables que han de ser introduïdes per tal de controlar degudament el funcionament de les màquines, que passen de ser simples impressores 3D a convertir-se en veritables centres de fabricació personalitzada.



Figura 6.2-4. Esquerra: Ventilador de capa per a la consolidació de les capes de fil en el moment de la impressió. Dreta: Capçal específic per a la deposició de material en forma de pasta en lloc de bobines de fil.

Dins del cas d'estudi de les tecnologies de Deposició de material, l'any 2010 també es va adreçar el cas metàl·lic, del qual se'n va arribar a dissenyar una topologia de màquina per a la tecnologia de TWAM, si bé només es va arribar a provar parcialment (Veure Figura 6.2-5).

Dita tecnologia, que es va posar en funcionament amb la col·laboració de la "Université de Montpellier 2" (UM2 - Campus de Nimes) i del Centre Internacional de Mètodes Numèrics en l'Enginyeria (CIMNE) i dels alumnes del Departament d'Enginyeria Mecànica a l'EUETIB Joshua Sánchez, David Santamaria i Jordi Santamaria, utilitza equips de soldadura de Tungstè per

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

generar un cordó de material metàl·lic que es pot dipositar utilitzant una topologia de màquina-eina de tres eixos cartesianes (similars al cas anterior, si bé necessàriament molt més robustos).

Aquest cordó de material suposa una aportació que pot servir tant per fer peces senceres com per fer petites reconstruccions locals de material en parts de peces metàl·liques que hagin sofert un desgast excessiu. Malauradament, el desavantatge principal de l'aplicació d'aquest tipus de procés en materials metàl·lics és que les peces fabricades no solen ser peces que tinguin l'acabat final desitjat, sinó que cal afegir-hi etapes suplementàries posteriors de mecanització i acabat.

Si bé la feina de disseny conceptual de l'equip i de l'estudi tèrmic dels materials es va completar satisfactòriament, les proves de concepte realitzades amb el capçal de deposició, utilitzant com a estructura base una Fresadora amb Control Numèric comercial (*Milltronics RH20*) de tres eixos cartesianes, van posar de manifest la complicació tecnològica de la materialització de l'equip així com l'alt nivell de cost de les solucions resultants (Veure Imatges de la Figura 6.2-5).

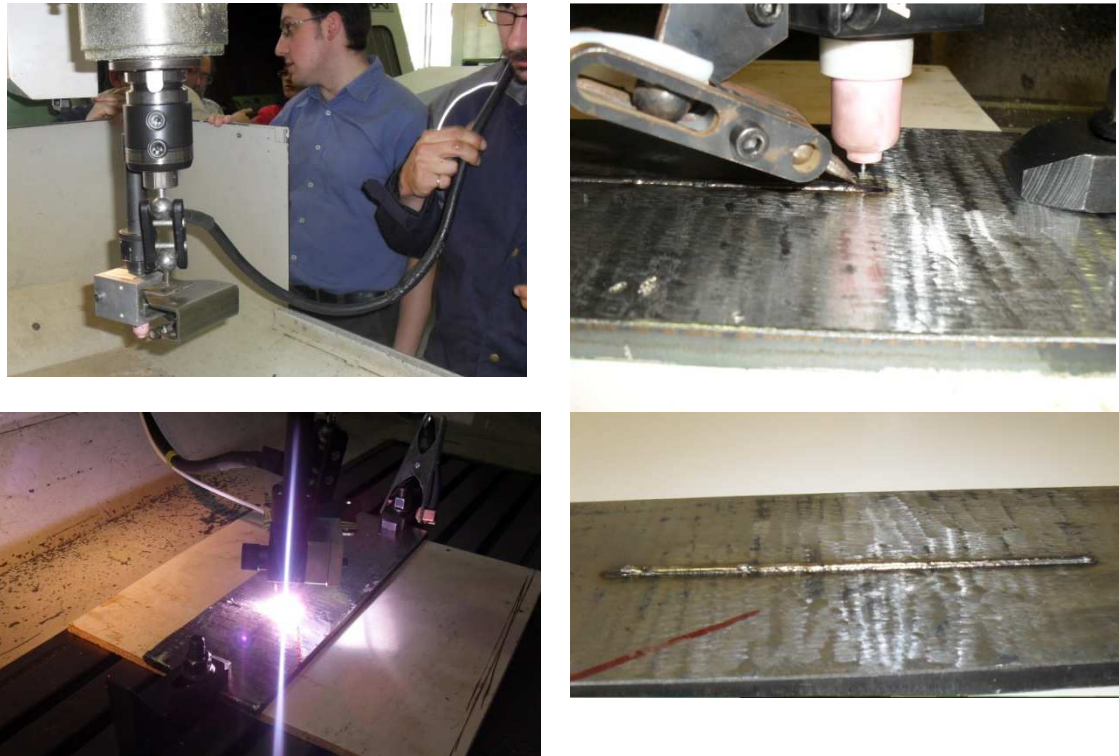


Figura 6.2-5. Proves de deposició de cordó metàl·lic mitjançant soldadura de Tungstè dutes a terme a la Fundació CIM el 27/05/2010.

Donat que en l'aplicació seriada de soldadura de Tungstè es realitza una aportació de gasos per protegir la punta de l'elèctrode (normalment Argó, Heli o una combinació de tots dos), una màquina de fabricació additiva per soldadura de Tungstè per realitzar peces finals de manera industrial requeriria una topologia tancada i amb ventilació controlada. D'altra banda, tant el material com els consumibles tenen costos elevats, el qual dóna com a resultat una especificació de màquina amb costos elevats i per tant amb una viabilitat econòmica molt compromesa.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

De fet, en alguns sectors d'alt valor afegit –com podria ser l'aeronàutica-, la fabricació de peces mitjançant la fabricació additiva encara es troba encallada en etapes normatives i regulatòries encaminades a proporcionar estàndards que possibilitin obrir els mercats amb confiança tecnològica.

El treball de conceptualització de la màquina de Fabricació Additiva mitjançant la soldadura de Tungstè (TWAM, de l'anglès “*Tungsten Welding Additive Manufacturing*”) és el que recull la Figura 6.2-6. Donat que l'aplicació d'aquesta tecnologia permet fabricar peces metàl·liques, la màquina de TWAM es va dissenyar de manera que fos capaç de produir peces que no tinguessin raó de ser produïdes mitjançant mètodes sostractius. En concret, es va realitzar un disseny de màquina amb una superfície de treball molt gran (2m d'ample -eix 'X'- per 2m de fondària -eix 'Y'-) per tal que fos capaç de fabricar peces molt grans, molt esveltes i de geometries molt complicades. La topologia de màquina era tancada per tal d'acomplir amb les necessitats de l'aportació de gasos i el recorregut en l'eix vertical 'Z' era molt reduït degut a la pròpia naturalesa de les peces objectiu a ser-hi fabricades, tot donant una estructura similar a la d'una impressora tipus “*plotter*”.

L'especificació dels eixos i dels elements mòbils de la màquina en variables binàries i contínues proporciona una descripció molt semblant a la de les màquines de Fabricació Additiva per deposició de plàstic presentada a la Figura 6.2-3. En aquest cas, també es tenen 3 variables binàries: 'X', 'Y' i 'W' que representen els desplaçament segons els eixos 'X' i 'Y' del pla de treball i l'activació de l'elèctrode i aportació de gas 'W'. Si bé, però, en contraposició al cas de plàstic només hi ha un eix continu (l'eix vertical 'Z') i no és necessari controlar la temperatura de la plataforma de construcció.

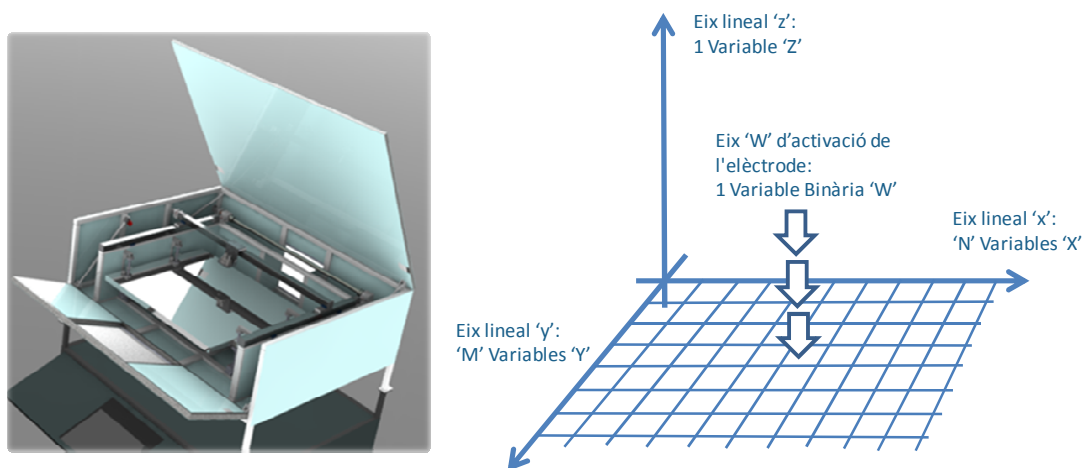


Figura 6.2-6. Esquerra: Màquina de Fabricació Additiva per TWAM dissenyada. Dreta: Especificació dels eixos i dels elements mòbils de la màquina en variables binàries i contínues.

Les materialitzacions presentades en l'entorn de la impressió en 3D dels anys 2010 i 2011 van suposar la llavor del projecte *RepRapBCN* que en els darrers anys ha agafat una gran dimensió i ha aconseguit consolidar el disseny d'impressores amb funcionalitats molt evolucionades. D'aquest projecte se'n pot trobar més informació a l'Annex 5 i en concret a l'apartat A5.2 “*Sistemes de fabricació locals per a un món global. El cas RepRapBCN de la Fundació CIM.*”

6.3. Cèl·lules de Fabricació Flexible per a operacions de muntatge

De la mateixa manera que les màquines (siguin per a la deposició de material o per a l'arrencament d'encenalls) es basen en la realització de moviments per part dels diferents eixos i altres elements mòbils, mitjançant l'especificació de variables binàries i/o contínues, es pot fer una generalització per als diferents elements mòbils continguts en Cèl·lules de Fabricació Flexible.

De fet, dins d'una Cèl·lula de Fabricació Flexible s'hi poden trobar multitud de sistemes i subsistemes (robots, pinces, cintes transportadores, equips de reconeixement...) que funcionen a partir de la programació de moviments de les diferents variables de sortida de que disposa cadascun d'aquests. Per tant, fent el símil entre màquina i sistema dins d'una Cèl·lula de Fabricació Flexible, queda clar que una Cèl·lula completa podrà tenir el mateix tractament que una màquina amb la dificultat que els Models del Món hauran de tenir sota control moltes més variables i informació que en els casos anteriors.

La materialització del concepte d'Arquitectures Àgils de Fabricació per a operacions de Muntatge de peces pot ser una resposta efectiva a moltes problemàtiques actuals en els processos de fabricació de les empreses, derivades de la necessitat de combinar adequadament flexibilitat i senzillesa. Com a cas específic, una estació de muntatge Àgil pot ser utilitzada com una forma efectiva d'implementar una línia de fabricació flexible de forma fàcil i ràpida per a petites series o per a sèries de curta permanència temporal, cas en el qual s'exigiria que fos capaç de funcionar de forma autònoma i amb les mínimes instruccions possibles.

Així mateix, altres usos d'una estació de muntatge Àgil poden ser:

- i) Una posició de treball on transcorre part del procés de fabricació d'un producte, que complementa a altres estacions de treball, siguin humanes o flexibles
- ii) Una posició extra de treball per si es produeix un coll d'ampolla eventual en una línia de fabricació
- iii) Una posició de reserva per a desbloquejar línies de producció quan una de les posicions ha quedat aturada interrompent el procés productiu.

Les estacions de Muntatge Àgil solen treballar amb peces petites; és a dir, de baix pes i dimensions reduïdes. Les etapes de treball de camp dutes a terme dins la tasca de caracterització de processos productius realitzada per al Projecte "*Estació de Muntatge Universal*" (Veure Annex 4 - A4.3.3. *El cas dels Productes de Consum*), posen de manifest que en els processos productius en els quals intervenen les operacions contemplades en el marc del present projecte es poden trobar primordialment dos tipus de topologia: processos de muntatge estrictament lineals i processos de muntatge amb topologia en forma d'arbre.

Els processos de muntatge estrictament lineals són aquells en els quals a cada fase del procés només s'incorpora una peça (o conjunt de peces degudament premuntat) al muntatge en curs. Dit d'altra manera, el resultat final del procés productiu és el que resulta d'agafar la primera peça i anar incorporant elements "sense deixar-la anar". Un clars exemples d'aquest tipus de procés de muntatge és l'ensamblatge E3 (endoll), proporcionat per l'empresa BJC per a la realització del projecte "*Estació de Muntatge Universal*" (Veure Figura 6.3-1).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

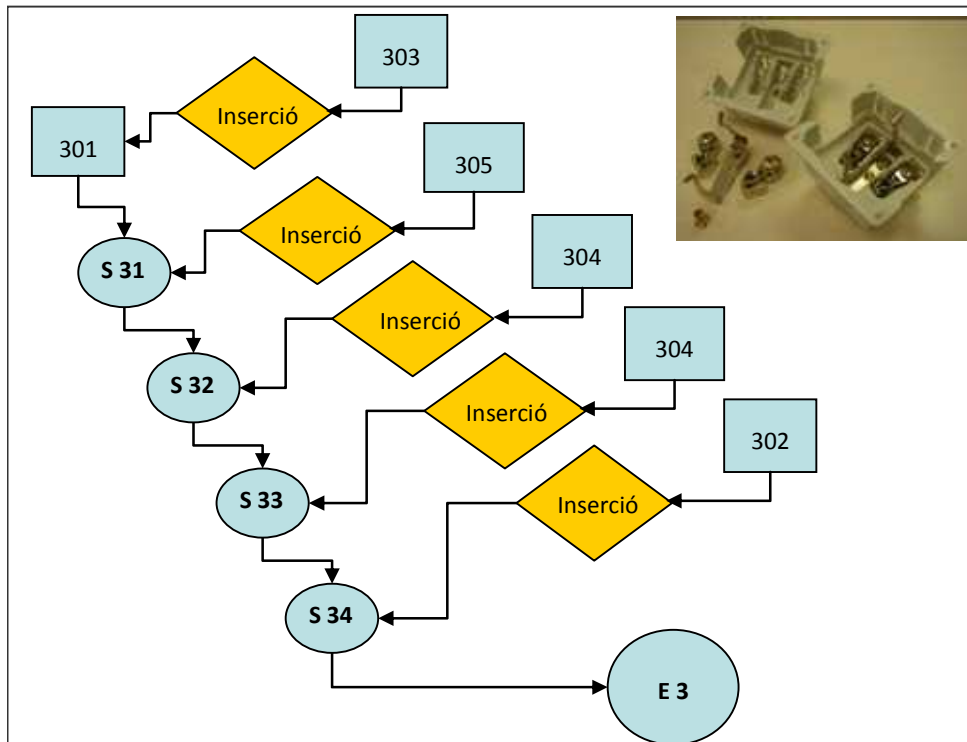


Figura 6.3-1. Procés de fabricació lineal, sense ramificacions, corresponent a l'ensamblatge estudiat E3 (endoll) del Projecte "Estació de Muntatge Universal" proporcionat per l'empresa BJC.

En aquest tipus de topologia de procés és possible utilitzar la primera peça com a base per anar integrant la resta, sovint sense necessitat de deixar-la anar i tornar a recollir, el qual simplifica enormement les operacions de subjecció i manipulació.

En contraposició a aquest tipus de muntatge, es troben els processos de fabricació on hi intervenen topologies en arbre; és a dir, que inclouen ramificacions. En aquests tipus de procés, el muntatge ja no és un procediment lineal, sinó que cal realitzar una sèrie de petits ensamblatges a partir de peces que després es combinaran adequadament per a obtenir el conjunt final desitjat.

De fet, molts dels ensamblatges presents a la indústria presenten alguna ramificació en el seu procés productiu, tal com va posar de manifest l'estudi de camp realitzat en el marc del Projecte "Estació de Muntatge Universal". El diagrama de la Figura 6.3-2 recull com a exemple el procés productiu de l'ensamblatge E5 (tapa per a batedores de Taurus), el qual presenta una ramificació corresponent a la inserció de la polleguera 506 en el forat de la peça 501.

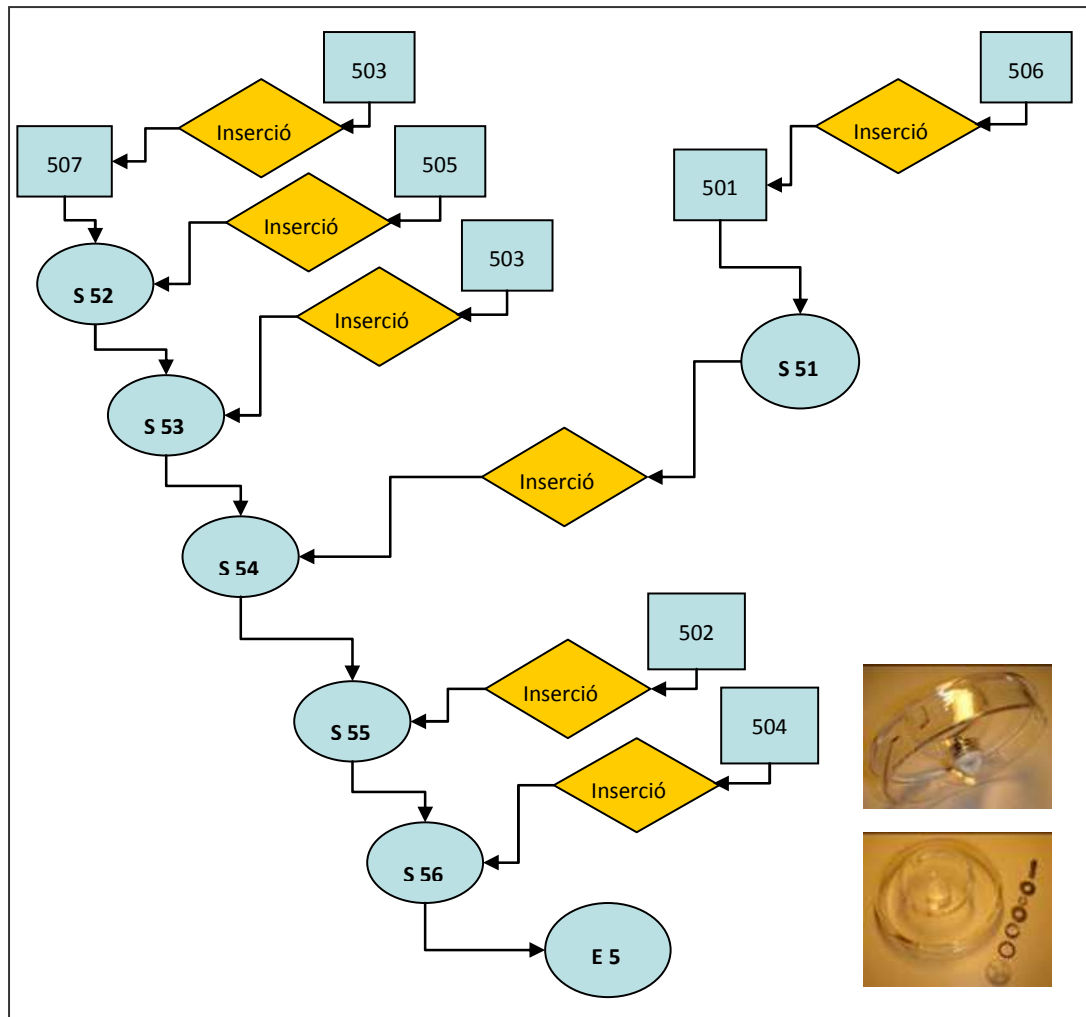


Figura 6.3-2. Procés de fabricació en arbre amb ramificacions, corresponent a l'ensamblatge estudiat E5 (tapa per a batedores) del Projecte "Estació de Muntatge Universal" proporcionat per l'empresa Taurus.

Respecte a aquest segon tipus de procés se'n poden fer dues consideracions importants. La primera és que les topologies en arbre no són més que la combinació de processos lineals i que per tant, és qui dissenya el procés qui ha de decidir sobre la seva necessitat o la possibilitat de dissenyar per a facilitar l'ensamblatge. D'altra banda, també és important mencionar que si finalment és inevitable implementar aquestes topologies, això tindrà una sèrie de conseqüències directes sobre la planificació i l'operació de la producció. Concretament, farà necessària la introducció d'un espai de treball on dipositar els ensamblatges en curs i fins i tot preveure la necessitat de deixar-los anar i tornar a agafar-los posteriorment.

De manera similar al cas de les màquines per a la deposició de material, les Cèl·lules de Fabricació Flexible dedicades al muntatge de components són també entitats molt adequades per a l'aplicació dels algoritmes desenvolupats en la present Tesi Doctoral per a la implementació d'Arquitectures Àgils de Fabricació per diversos motius.

En primer lloc, els diferents tipus de seqüències de muntatge hi són molt favorables, doncs es tracta d'operacions en forma correlativa o com a molt en arbre, que són fàcils d'implementar

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

en forma de cadena lògica. En segon lloc, els diferents subsistemes continguts dins la Cèl·lula de Fabricació estan intercomunicats i per tant es poden construir Models del Món d'àmbit global en lloc d'àmbit local. Finalment, tot i que els diferents subsistemes poden implicar patrons de conductes complicades, també contenen multitud de sensors que poden ajudar a donar informació fins i tot d'altres subsistemes continguts en el global, diferents a aquell en el que està situat.

6.3.1. Implementació d'Arquitectures Àgils de Fabricació per a operacions complexes de muntatge de components

Seguint amb les especificacions apuntades en els apartats i Capítols anteriors, per tal que una Cèl·lula de Fabricació de Muntatge de peces accompli totes les característiques demandades, és necessària la implementació efectiva de subsistemes que interactuïn entre sí.

D'acord amb el treball realitzat en el marc del Projecte "Estació de Muntatge Universal", aquesta implementació d'entitats independents es pot dur a terme dividint el sistema global en set subsistemes que són comentats a continuació (Veure Figura 6.3-3). Cada un d'aquests subsistemes posseeix identitat pròpia i presenta una sèrie de particularitats que fan necessària una integració de dos nivells: el nivell intern i el sistema en global.

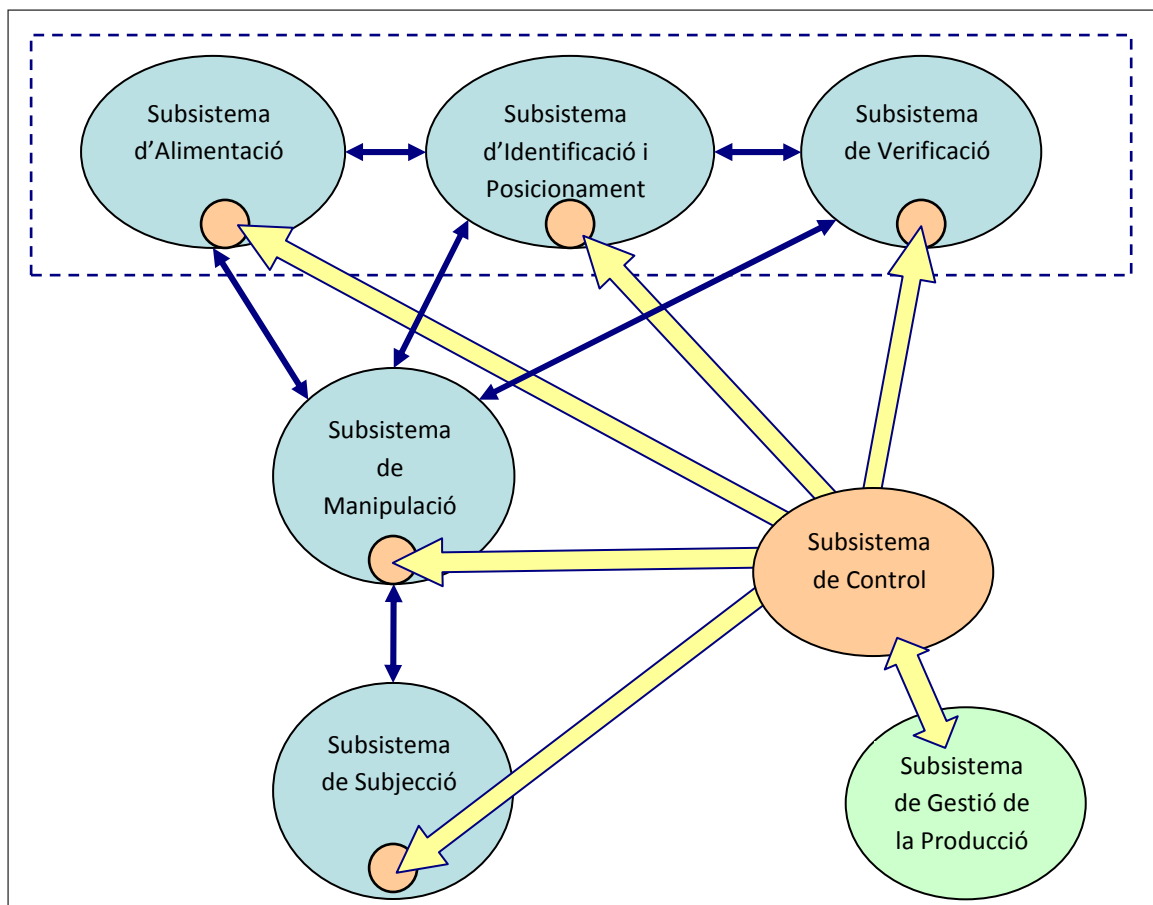


Figura 6.3-3. Topologia global dels subsistemes continguts en una estació de Muntatge Àgil per al Projecte "Estació de Muntatge Universal".

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

A nivell intern, cada subsistema ha de ser capaç de realitzar una sèrie de tasques concretes de forma independent. Com que ha de ser autònom -en el sentit que ha de ser capaç de desenvolupar una sèrie de labors sense ajut exterior-, és necessari que tingui una arquitectura de control pròpia i diferenciada de la resta de subsistemes de l'estació. A més, aquest sistema de control distribuït ha de ser expert i ha de tenir capacitat per a aprendre del procés que realitza a mesura que el va desenvolupant.

A nivell global, totes aquestes arquitectures de control han de ser integrades conjuntament en un ens de control global, encarregat de la programació i recopilació d'informació que sigui capaç de gestionar el funcionament de l'estació, assignar recursos i llançar accions.

Entre els set subsistemes especificats, es tenen per una banda tres subsistemes (Alimentació, Identificació i Verificació) que s'encarreguen de les operacions complementaries del propi procés de fabricació. A nivell de maquinari, aquests tres subsistemes estan molt interrelacionats i en algunes accions concretes comparteixen recursos.

A més d'aquests tres, tenint en compte que es tracta de realitzar operacions de muntatge, els dos subsistemes que s'encarreguen de les operacions efectives de fabricació són els subsistemes de manipulació i subjecció. El subsistema de manipulació és el que s'encarrega de certes etapes de transport intern així com de completar les operacions de fabricació contemplades (inserció, cargolament, doblegament, etc.). El subsistema de subjecció és un element d'ajut al subsistema de manipulació i per tant a la implementació final de la fabricació de productes. La seva funció és servir de punt de suport i referència per a sostenir les peces o els subensamblatges de peces mentre encara estan prenent part del procés de fabricació.

D'altra banda, en un nivell d'abstracció molt més elevat, es troba el subsistema de Gestió de la Producció, el qual s'encarrega d'estructurar, planificar i llançar les ordres de fabricació. Aquest subsistema és el que s'encarrega d'assignar recursos i de decidir la seqüenciació de treball de cadascun d'ells. Finalment, el subsistema de Control de l'estació és l'encarregat d'actuar sobre els diferents elements de control distribuït dins de cada subsistema específic. Aquest subsistema té un paper integrador molt rellevant i és el que fa actuar a cadascun dels subsistemes a l'uníson, de manera que cada un d'ells col·labori per a aconseguir assolir un objectiu comú.

Entre tots aquests subsistemes, els dos sistemes encarregats de les operacions de muntatge (subsistema de Manipulació i subsistema de Subjecció) i els tres subsistemes dedicats a operacions auxiliars (subsistemes d'Alimentació, Identificació i Verificació) van requerir la posada en funcionament de demostradors parcials físics.

En el cas de l'alimentació, donada la complexitat del problema per a casos d'utilització de sistemes altament flexibles, es van plantejar diversos sistemes diferents per tal d'estudiar, afrontar i resoldre el problema de la alimentació des de diferents enfocaments (Veure Figura 6.3-4).

En primer lloc, per tal de materialitzar un sistema dispensador de peces altament flexible es va materialitzar un prototipus de rampa dispensadora de peces controlada per un motor elèctric que abocava components en un pla d'identificació. La rampa dispensadora de peces partia d'un dipòsit de metacrilat transparent on es trobaven les peces de partida del mateix tipus col·locades a dojo. La cinta transportadora (que era alhora la part inferior del dipòsit de

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

metacrilat) recollia les peces i les anava posicionant de forma aleatòria. Al final de la cinta les peces arriben a la rampa de caiguda feta de xapa, per on lliscaven fins a la superfície d'arribada. A l'últim tram de la rampa, uns sensors de posició enviaven una senyal per aturar el moviment de la rampa quan detectaven que alguna peça havia assolit la superfície d'arribada.

Quan el sensor del final de la rampa detectava que ja havia passat la primera peça aturava la cinta. D'aquesta forma es disposava d'un grup reduït de peces a sobre de la taula d'alimentació flexible alimentada per un doll d'aire capaç d'orientar i moure les peces de manera que la rampa facilitava la tasca al sistema de visió encarregat de seleccionar les diverses peces per a la seva posterior manipulació.

Una altra aproximació a la alimentació van ser els dispensadors i contenidors de peces adaptats per a ser manipulats pel robot antropomòrfic de 6 eixos ABB IRB140, per tal d'abordar l'alimentació flexible de peces a través de la seva dosificació. Els contenidors dispensadors de peces disposaven d'unes pales dispensadores a la part inferior que podien ser actuades mitjançant la rotació d'un eix sortint, de forma que en realitzar girs s'alliberessin peces en petites quantitats dins els contenidors especials, que podien ser manipulades pel robot antropomòrfic. Posteriorment el robot desplaçava la safata fins a la taula d'alimentació flexible alimentada per doll d'aire, on hi desava el seu contingut (Veure Figura 6.3-4).

El robot ABB també tenia assignada la funció d'element de manipulació del sistema gràcies a un sistema de subjecció constituït per un joc de pinces revòlver compostat per pinces diferents. De fet, a la Cèl·lula de Fabricació hi havia un altre tipus de robot (SCARA de 4 eixos) amb qui es compartien les tasques de manipulació i subjecció amb l'objectiu d'oferir més versatilitat al conjunt.



Figura 6.3-4. Esquerra: Cinta transportadora automàtica amb caiguda sobre pla d'identificació. Centre: Dispensadors de peces i Contenidors adaptats per a ser utilitzats per part del Robot antropomòrfic. Dreta: Robot antropomòrfic de 6 eixos.

Pel que fa a l'aplicació dels algoritmes presentats, l'especificació en variables binàries i contínues tant de la cinta com dels dispensadors és bastant senzilla (si bé la seva representació dins l'"Espai d'Estats" és poc intuïtiva).

Concretament, la cinta conté una variable de rotació de l'eix del motor (que imposa una velocitat lineal a les peces dipositades a la seva superfície) que es pot modelitzar com una variable contínua 'A', més una variable binària 'X' corresponent al pas d'una peça pel final de la cinta. Pel que fa als dispensadors automàtics, la modelització inclou una variable binària de gir

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

de l'eix 'B' (és binària doncs per motius de construcció el gir només deixa caure peces en múltiples de 60°), més una variable de posició lineal 'Y' que suposa la posició del contenidor sota la zona de caiguda de peces. En el cas dels contenidors, però, també seria apropiat de modelitzar la seva posició segons els eixos mòbils del robot antropomòrfic ja que en essència el robot és l'element que pot disposar dels sensors de posició necessaris per a cadascun dels seus eixos mòbils i en definitiva és el que realitzarà les operacions. La modelització d'aquests subsistemes queda recollida a les imatges de la Figura 6.3-5.

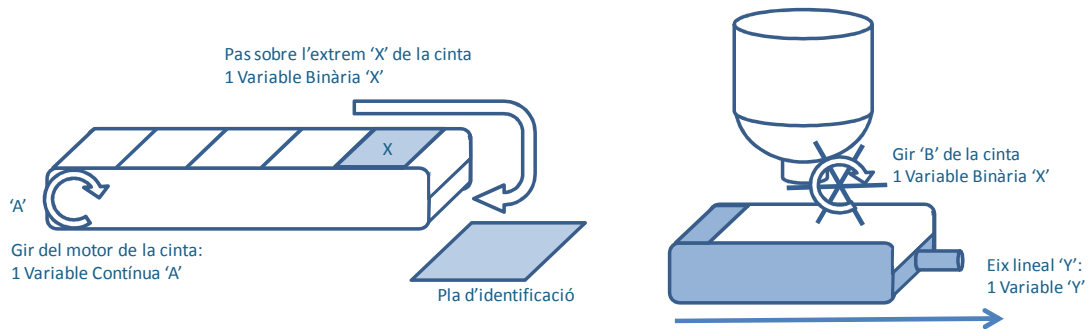


Figura 6.3-5. Esquerra: Especificació de variables binàries i contínues de la Cinta transportadora automàtica amb caiguda sobre pla d'identificació. Dreta: Especificació de variables binàries i contínues dels Dispensadors de peces i Contenidors adaptats.

D'altra banda, el sistema d'inspecció altament flexible tenia com a objectiu la verificació dimensional de les diverses peces que formaven part dels muntatges objecte d'estudi. Aquest sistema combinava dos sistemes d'il·luminació diferents i complementaris: la cúpula d'il·luminació de llum difusa necessària per al reconeixement de peces comunes i el "backlight" de LED's (o sistema d'il·luminació per contrast) per a les peces transparents. La cúpula, a més, estava automatitzada de manera que permetia enretirar-se per a fer lloc als robots que així poden operar lliurement sobre la superfície de treball d'inspecció (Veure Figura 6.3-6).

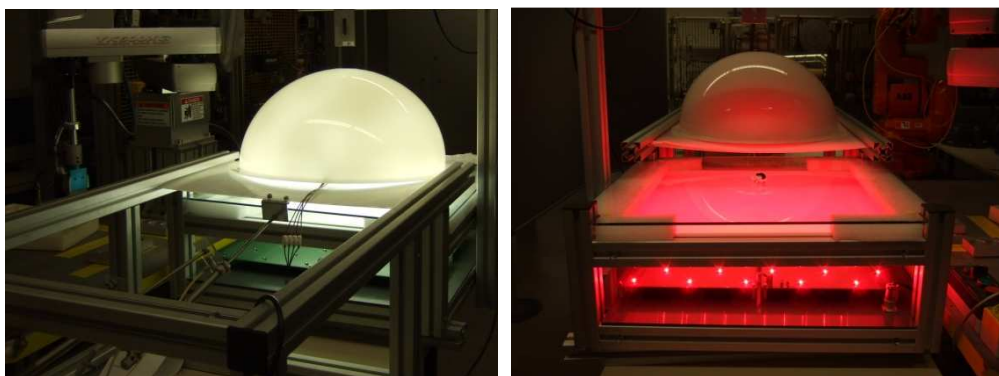


Figura 6.3-6. Esquerra: Cúpula situada sobre el pla d'identificació amb llum blanca encesa. Dreta: Cúpula enretirada i sistema d'il·luminació per contrast de llum vermella activada.

Durant el funcionament normal de l'estació, les peces que arribaven a la taula de verificació eren cobertes per la cúpula d'il·luminació de llum difusa, que tenia en el seu interior un fluorescent. Quan aquest estava encès, la peça s'il·luminava i la càmera situada en el punt

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

central del pla, just per sobre de la cúpula, podia detectar la posició i orientació de les peces. En el cas de peces opaques, la càmera les detectava sense problemes i es realitzava la inspecció corresponent. En el cas de peces transparents que no podien ser inspeccionades correctament, s'encenien els LED's del sistema d'il·luminació per contrast ("backlight") i es realitzava una segona tongada de captació i processat d'imatges.

En cas que fos necessari prendre imatges d'altres cares de la peça, la cúpula podia enretirar-se i els robots de l'arquitectura podien modificar-ne la posició. Quan la inspecció es donava per finalitzada o bé si la peça havia estat declarada no vàlida, la cúpula podia enretirar-se, de forma que els robots podien accedir a l'àrea de treball i agafar-la per a procedir a la seva manipulació, muntatge i/o rebuig.

La modelització del sistema d'identificació i inspecció en variables binàries i contínues és de nou força senzilla. D'una banda, el sistema d'il·luminació només necessita dues variables binàries ('U' i 'V') per a conèixer l'estat d'activació de la llum blanca i vermella, més una altra variable contínua ('W') per conèixer el desplaçament de la cúpula segons el seu eix mòbil. Dit això, l'element que sí que necessita un estudi a part és la modelització del robot antropomòrfic, que requereix una variable contínua per a conèixer la informació relativa al funcionament de cadascun dels seus 6 eixos mòbils de revolució ('R1', 'R2', 'R3', 'R4', 'R5' i 'R6'), més una variable binària per al setè eix de revolució corresponent a la selecció de la pinça necessària ('R7') i una darrera variable binària per a la obertura i tancament de les pinces ('P').

Aquestes modelitzacions (presentades a la Figura 6.3-7) posen de manifest que, si bé els models de cada subsistema poden ser obtinguts de manera senzilla, el mètode pot arribar a gestionar models complicats quan s'afegeixen en un gran model global. Aquesta casuística d'addició de variables locals en un model global obre la porta a poder gestionar les Cèl·lules de Fabricació Flexible com a entitats globals i per tant, a assolir els reptes fixats en quant a la materialització d'Arquitectures Àgils de Fabricació.

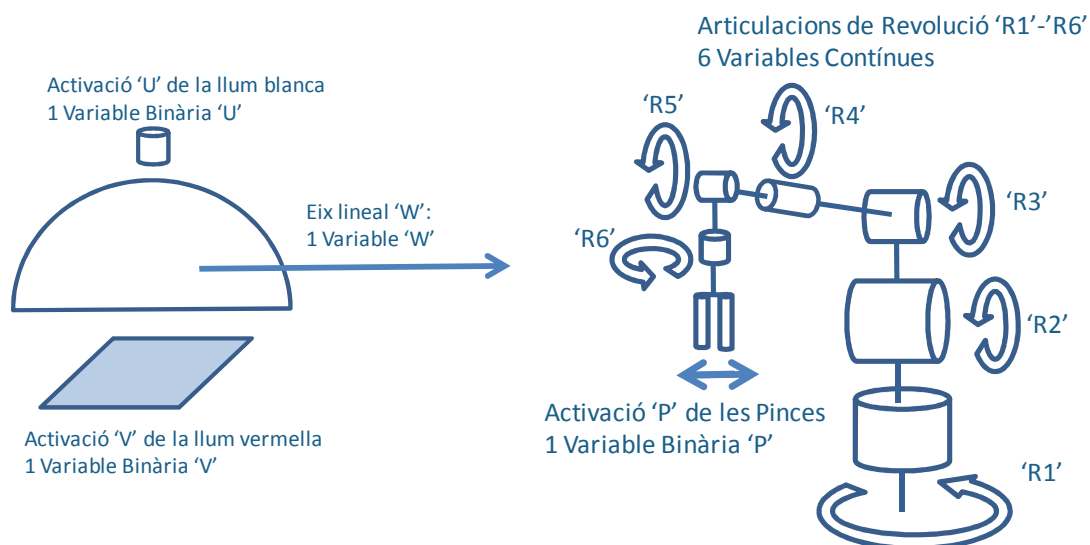


Figura 6.3-7. Esquerra: Especificació del sistema d'identificació i inspecció en variables binàries i contínues. Dreta: Especificació del robot antropomòrfic en sis variables contínues ('R1'-'R6') i una variable binària ('P').

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Tots els subsistemes descrits van ser objecte d'estudi i desenvolupament en el projecte "Estació de Muntatge Universal". Les darreres tasques del projecte van incloure la integració i la fase de proves de la Cèl·lula de Fabricació Flexible desenvolupada, en les que es van realitzar pas per pas les diferents fases d'acció que duen a terme el conjunt d'elements en la seva operativa de funcionament.

La implementació física de la Cèl·lula es va dur a terme al Laboratori d'Automatització de la Fundació CIM, on també es van fer les demostracions de validació final per al tancament del projecte (Veure Figura 6.3-8).



Figura 6.3-8. Esquerra: Disseny 3D dels elements de la Cèl·lula de Fabricació del Projecte "Estació de Muntatge Universal". Dreta: Fotografia de part dels elements (rampa, il·luminació per contrast, robot antropomòrfic) en les etapes d'assaig i test.

Capítol 7. Conclusions i Treballs Futurs

7.1. Conclusions

La present Tesi Doctoral ha acomplert tots els objectius específics fixats com a contribució esperada per a la implementació de solucions altament flexibles de fabricació. Concretament:

- S'ha explorat amb detall la formalització de models lògics de comportament de sistemes i s'han desenvolupat algorismes de control d'agents aplicables a sistemes de fabricació genèrics.
- S'han desenvolupat programes (aplicació d'Espai d'Estats) en els quals s'ha pogut implementar els algorismes desenvolupats i fer-hi aplicacions experimentals.
- S'han estudiat i analitzat diferents topologies i arquitectures de màquines com ara Màquines-eina (Fabricació Sostractiva), Sistemes de producció per Fabricació Additiva i Cèl·lules de Fabricació Flexible (operacions de muntatge de components).
- S'ha estudiat i analitzat amb detall el context dels sistemes de Fabricació Àgil en multitud de projectes de Recerca de la Fundació Privada Centre CIM i de la comunitat de creació de programari i maquinari lliure i obert i també a través de casos paradigmàtics d'interacció entre producte i procés com són el cas Biomèdic, el cas de la joguina i el cas dels productes de consum.

En els Capítols 1 i 2 de la present Tesi Doctoral s'ha revisat el marc i l'estat de l'art de les estacions de treball altament flexibles i de les tecnologies de fabricació àgil. En efecte, aquestes *Arquitectures Àgils de Fabricació* tracten de respondre alhora a un repte tecnològic i a una necessitat industrial. El repte tecnològic prové d'intentar materialitzar unes Cèl·lules de Fabricació que responguin a criteris com la *Resposta Ràpida*, l'*Adaptabilitat*, la *Reconfigurabilitat*, la *Robustesa*, la *Transformació del Coneixement*, la *Cooperativitat* i la *Universalitat* dels subsistemes que les componen. D'altra banda, la necessitat tecnològica industrial respon a la imposició dels mercats, que volen productes innovadors i personalitzats i imposen als fabricants sèries de producte cada cop més curtes i que necessiten cada cop més immediatesa de reacció als canvis de tendència del mercat.

Per aconseguir arribar a solucions capaces d'acomplir aquestes demandes, una anàlisi de la literatura revela quines han estat les aproximacions de molts grups de recerca i també de la indústria per implementar solucions a aquestes demandes del mercat. Pel que fa a les eines aportades per les diferents disciplines de la Intel·ligència Artificial, molts grups se centren en el desenvolupament de sistemes intel·ligents basats en xarxes neuronals, lògica difusa, sistemes experts o combinacions de totes o algunes de les tres. Altrament, també es destaca una altra corrent que aproxima la construcció de bases de coneixement mitjançant models lògics i mètodes inductius i deductius. Pel que fa a la materialització física d'aquests sistemes, alguns grups punters estrangers compten amb implementacions elaborades d'aquests tipus d'arquitectures i posen de manifest la potencialitat derivada d'aquest tipus de solucions.

En el Capítol 3 del present treball, es realitza una primera introducció al modelat lògic del comportament de sistemes de fabricació mitjançant la utilització d'una aproximació d'aquest

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

fet a sistemes automàtics que havia estat postulada pels professors Joan Ramon Gomà i Joan Vivancos . En concret, s'analitzen amb detall les funcions de canvi d'estat i les Classes (primera, segona tercera o quarta) dels objectes descoberts en un total de quatre sistemes diferents. Els resultats d'aquesta experimentació i l'anàlisi de resultats permeten postular els quatre Corol·laris de la Teoria Lògica presentats a l'Apartat 3.3.3. els quals són d'una importància cabdal per comprendre les possibilitats i limitacions del model teòric enunciat.

En el Capítol 4, a partir dels resultats i la experimentació realitzada sobre el model lògic anterior, es formula una nova metodologia i nous algorismes lògics per a la construcció de *Models del Món* $[\Omega]$ en sistemes que continguin únicament variables binàries (enteses com variables que només poden prendre dos valors diferents: '0' o '1'). Aquesta metodologia és capaç d'arribar satisfactòriament a construir Models de comportament del sistema i el seu entorn. En aquest nou conjunt d'algorismes, es divideix la construcció de Models del Món en dues etapes diferenciades: *l'Etapa d'Exploració del Món* i *l'Etapa d'Execució de Tasques*, que s'utilitzen per construir Models seqüencials en els que cada Model següent incorpora la informació de l'anterior. A l'Etapa d'Exploració del Món, el sistema realitza aprenentatge de tipus deductiu (el sistema explora i aprèn a partir de l'observació). A l'Etapa d'Execució de Tasques, el sistema realitza aprenentatge de tipus inductiu mitjançant l'aplicació de prejudicis (el sistema suposa fets per a elaborar altres teories diferents de les conegudes), que seran avaluades abans de ser incorporades com a coneixement dins de Models del Món successius. D'aquesta manera, el present treball realitza una contribució per aconseguir reduir el nombre d'experiments necessaris per a que el sistema sigui capaç de resoldre les tasques encomanades que no havien estat realitzades en treballs anteriors.

Els Algorismes formalitzats són cada cop més potents en la mesura que el sistema disposi de moltes senyals de sensors $[S]$ per poder monitoritzar estats i en definitiva poder aprendre sobre el comportament del Món a través dels resultats de l'aplicació de les diferents consignes de funcionament $\{\alpha\}$ enviades al sistema. A més, en la teoria presentada, els sensors $[S]$ es troben desacoblats de la realitat física del sistema, fet que fa possible canviar les regles de funcionament del Món sense comprometre la viabilitat del sistema. En aquest supòsit, el model lògic també funcionarà donat que es troben en nivells d'abstracció diferents.

L'aplicació de prejudicis s'aborda des d'un enfocament algebraic clar sobre la taula de funcions de canvi d'estat (*Tupla* $[\psi]$), tot proposant l'aplicació de prejudicis en estats ja coneguts sobre Funcions de canvi d'estat no conegudes $\{F'\}$ (prejudicis d'*Inferència Associativa* i d'*Abstracció per Analogia*) i també sobre estats no visitats $\{\xi'\}$ (prejudicis segons el criteri de Completesa Ontològica).

Per poder disposar d'un laboratori d'experimentació on poder avaluar la bondat dels algorismes, es programa una aplicació en C+ a l'entorn *Microsoft® Visual Studio®* que serveix per demostrar que la Teoria proposada és factible i que pot ajudar en la implementació de sistemes intel·ligents mitjançant Arquitectures Àgils de Fabricació. En consonància amb aquesta materialització, l'Annex 2 recull una sèrie d'apartats a mode de Manual per a facilitar la comprensió i els punts més importants d'aquest banc de proves anomenat "*Espai d'Estats*".

L'experimentació en els diferents entorns de treball (teòric i experimental per ordinador) posen de manifest la importància de diferents aspectes en la obtenció de Models explicatius del comportament del Món. Per exemple, es declaren com a fonamentals les estratègies escollides per a realitzar exploracions del Món, ja que diferents exploracions proporcionen Models amb informació diferent. Altrament, la bondat relativa de les solucions trobades en

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

l'Etapa d'Execució de Tasques (que s'assumeix dependent del cost de les solucions trobades) implica que per discernir de la millor manera possible quina solució és millor per a cada arquitectura analitzada, cal poder implementar diferents mètodes de càlcul de costos. Per aquest motiu, una de les funcionalitats obertes a l'"Espai d'Estats" és la possibilitat d'incorporar càlcul de costos ponderats segons cadascuna de les consignes de sortida $\{\alpha\}$ utilitzades.

A continuació, en el Capítol 5 es realitza l'extensió de la nova metodologia i els nous algorismes a sistemes que continguin variables contínues (enteses com a variables que poden prendre com a valor de resposta qualsevol valor dins d'un rang) i se'n realitza el modelat amb l'aplicació "Espai d'Estats" desenvolupada en base *Microsoft® Visual Studio®*. En relació amb aquesta implementació de programari, l'Annex 3 recull informació important sobre la programació d'eines dedicades a la Fabricació i en concret a la selecció intel·ligent de sistemes de Fabricació en els quals l'autor ha pogut tenir la oportunitat de participar durant el desenvolupament del present treball. D'aquestes experiències es recullen lliçons apreses importants com ara quines són les necessitats bàsiques en matèria de funcionalitat, usabilitat, factor humà, premisses de disseny i unes notes sobre construcció de Bases de Coneixement que puguin suportar el contingut necessari en aplicacions de l'envergadura aproximada a la del present treball.

Finalment, la teoria lògica construïda es porta a l'avaluació de diferents tipus de sistemes de fabricació: (i) màquines d'arrencament d'encenalls o de fabricació additiva per deposició de material i (ii) Cèl·lules de Fabricació Flexible. Es determina quins són els casos més adequats per a l'aplicació dels models desenvolupats i es realitza també l'especificació de les variables (tant binàries com contínues) que serien necessàries per a aplicar-hi els algorismes amb l'objectiu de construir *Models del Món* del sistema i del seu entorn. En tot moment, es manté un abordatge genèric i obert, per tal de possibilitar una solució apropiada per a la majoria de plataformes de fabricació.

En el present Capítol 7, després de revisar les Conclusions, s'avalua la situació actual dels sistemes de fabricació concloent com les aplicacions propietàries i tancades han copsat històricament els processos de fabricació d'alt nivell. Amb un esperit de millora, també es recullen els Treballs Futurs albirats relatius a la present Tesi Doctoral i es proposen solucions com les topologies *iCAM* (CAM intel·ligent) que haurien de permetre desplegar la vertadera intel·ligència en els sistemes automàtics de fabricació.

Finalment, s'inclouen dos Annexos molt importants sobre l'anàlisi de Tendències i els canvis de paradigma en el món del producte i el procés. Així doncs, l'Annex 4 (*Fabricació en massa de béns personalitzats. Fabricació Poc Convencional*) revisa quins són els paradigmes de la fabricació del segle XXI tot recollint els seus principals reptes i oportunitats. S'hi tracten solucions concretes amb les que hi poden fer front les empreses dedicades al desenvolupament de producte i procés, de la aplicació de les eines de l'Enginyeria Concurrent i la seva influència en el Cicle de vida del Producte i es demostra la seva aplicabilitat tot exemplificant la resposta als reptes presentats des de tres sectors rellevant diferents, com són els casos biomèdic, clúster de la joguina i béns de consum.

En darrer lloc, l'Annex 5 pretén ser el més visionari i disruptiu, tot formalitzant un estudi de l'escenari de la fabricació a mig termini que portarà a canviar l'ordre logístic i manufacturer al món. L'Annex 5 sobre sistemes de fabricació intel·ligent lliures i oberts conclou com els moviments en matèria de sistemes de fabricació de baix cost, oberts, sense llicència i

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

col·laboratius estan duent a terme i acceleraran el procés de canviar la manera de comprar, fabricar i consumir. El cas del “RepRap” i de la Comunitat “Maker” de la impressió 3D serveixen per demostrar com canviaran aspectes com el moviment de mercaderies, persones i informació. I tot això, havent-ho pogut explicar i contrastar des d'un seient de primera fila amb casos com el “RepRapBCN” de la Fundació CIM

Com s'ha vist, les exigències dels clients fan que els productes a fabricar siguin molt diversos de manera que sorgeix la necessitat d'utilitzar programes capaços de realitzar aprenentatge de manera automàtica.

7.2. Context Present: Sistemes CAM actuals per a la generació de trajectòries 3D

De forma general, un sistema CAM (acrònim de l'anglès, “Computer Aided Manufacturing”) és un programa informàtic que s'encarrega de processar una geometria dibuixada per ordinador (amb un sistema CAD – de l'anglès, “Computer Aided Design”) per tal de generar un codi interpretable per una unitat de Control Numèric (CNC) d'un sistema de màquina-eina. Aquest codi conté informació per generar moviments en els diferents eixos mòbils de la màquina així com per a la realització d'operacions en els seus diferents accessoris (canvis d'eines, posada en marxa o aturada de la lubricació, obertura i tancament de portes, etc.).

Tal com s'ha presentat en els Capítols introductoris de la present Tesi Doctoral, els sistemes CAM més utilitzats en la actualitat són sistemes completament deterministes i que basen el seu funcionament en el coneixement exhaustiu de les capacitats de la màquina-eina a utilitzar i que no tenen en compte els eventuals canvis que es puguin produir en el Univers (entès com el conjunt format per la màquina-eina més la peça que està produint a partir de material en brut). D'aquesta manera, qualsevol canvi que hi hagi en el sistema més enllà de la pròpia màquina (peça, o fins i tot canvis en l'entorn) podrà donar lloc a col·lisions i funcionaments incorrectes en la fase d'execució del programa (veure Figura 7.2-1).

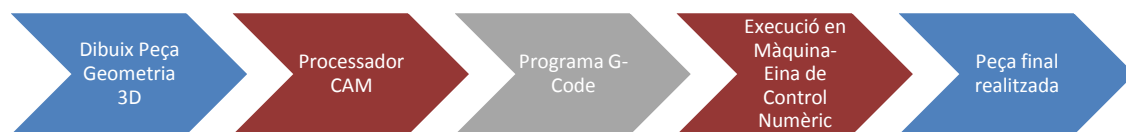


Figura 7.2-1. Procés d'obtenció d'una Peça mitjançant un processador CAM estàndard

Per aquest motiu, els programes de CAM comercialitzats per les empreses líders en el sector (per exemple *Dassault Systèmes*, *Siemens Software*, *Heidenhain*, *Delcam*, *Vero Software*, *Tebis* o *Cimatron*) estan destinats als grans mercats i es focalitzen en donar solucions a topologies de màquines tancades i propietàries, amb configuracions conegudes i invariants en el temps (no es contemplen canvis en l'Univers). Es tracta, doncs, de solucions propietàries que tenint com a principal objectiu la fiabilitat i la protecció de la propietat intel·lectual, impossibiliten dotar als CNC de les màquines-eina amb sistemes d'aprenentatge o inclús d'un cert grau d'intel·ligència [81, 82].

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

D'altra banda, l'interès d'explotació comercial intrínsec en aquestes solucions fa que estiguin desenvolupades per equips de programadors tancats, que no posen l'èmfasi en fer solucions que puguin ser desenvolupades per altres sinó tot el contrari. Així doncs, en el millor dels casos, si existeix la possibilitat d'accedir al codi font del sistema CAM que genera les trajectòries a ser reproduïdes pel CNC de la màquina-eina, és difícil i tediós interpretar el significat de les línies de codi i normalment impossible d'incorporar-hi noves funcionalitats d'una manera senzilla.

La majoria de Sistemes CAM actuals per a la generació de trajectòries en 3D són el que s'anomenen sistemes de codi *tancat i propietari*.

7.3. Treballs futurs

La situació descrita a l'apartat anterior, juntament amb les noves regles del joc imposades per la globalització de la producció i del coneixement, suposen un gir important en la manera en que es produirà en els propers anys. Les noves tendències despleguen un ventall d'oportunitats per a la implementació ulterior dels treballs realitzats en el context de la present Tesi Doctoral que es concreten en els tres apartats a continuació.

7.3.1. Implementació d'Algoritmes de construcció de models del món en sistemes àgils de Fabricació: el CAM intel·ligent

El món Occidental actual ha estat immers en una llarga recessió econòmica mentre les potències emergents (en especial la Xina) s'han convertit en fàbriques globals basades en una utilització intensiva de mà d'obra a uns costos molt baixos. Existeixen sectors productius en els quals aquestes diferències salarials dels treballadors no són tan importants ja que els productes necessiten ser produïts als països Occidentals; com per exemple productes amb curta data de caducitat o bé productes considerats com *estratègics nacionals* (principalment d'ús militar). D'altres productes, en ser considerats *de luxe* o de *molt alta qualitat*, solen ser també insensibles als costos de mà d'obra; doncs normalment es produeixen en quantitats molt petites i el seu preu de venda no és tant funció de l'addició de costos en un entorn de competència perfecta, sinó més aviat d'un posicionament de marca que intenta arribar a poques butxaques molt selectes.

Malgrat aquestes consideracions, la gran majoria de productes que es consumeixen poden ser produïts arreu i es veuen afectats en gran mesura pels costos de la mà d'obra implicada en la seva producció. I per competir amb els baixos nivells de costos dels països emergents, els països rics estan concentrant-se en desenvolupar processos productius altament automatitzats, de manera que el factor relatiu als costos de mà d'obra perdi importància relativa en els costos finals del producte.

No obstant, l'automatització de la producció de sèries curtes de productes és complicada i sovint econòmicament inviable. Per programar una cèl·lula de fabricació o fins i tot una sola màquina-eina per fabricar una peça cal dedicar una quantitat considerable d'hores en preparar el codi "G" que executarà el sistema. D'altra banda, un cop es posi en marxa la producció, el codi que s'estarà executant partirà sempre de la premissa determinista i d'invariabilitat dels paràmetres de sistema de producció que han estat programats.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Així doncs, els nous paradigmes de la Fabricació Integrada per Ordinador demanen que els nous sistemes de fabricació siguin:

- i) Intuïtius per a l'usuari; és a dir, que siguin ràpids i senzills de Programar
- ii) Conscients; és a dir, que siguin capaços de saber què canvia en el seu Univers
- iii) Intèrprets; és a dir, capaços d'interpretar com afecten els canvis al seu funcionament
- iv) Evolucionables; és a dir, capaços d'incorporar els canvis al seu funcionament

Aquestes necessitats tecnològiques situen l'estat de l'art en la demanda de sistemes CAM i CNC que vagin més enllà d'una simple execució seqüencial d'operacions per convertir-se en sistemes de "CAM intel·ligents" o *iCAM*.

Per tal de poder respondre a les citades demandes de *intuïtivitat*, *consciència*, *interpretació* i *evolució* exposades prèviament, els sistemes de *iCAM* han de ser sistemes integrables dins una sola interfície que interactuï tant aigües avall com aigües amunt en els graons de la cadena del procés d'obtenció d'una peça mitjançant una màquina controlada per ordinador (veure Figura 7.3-1).

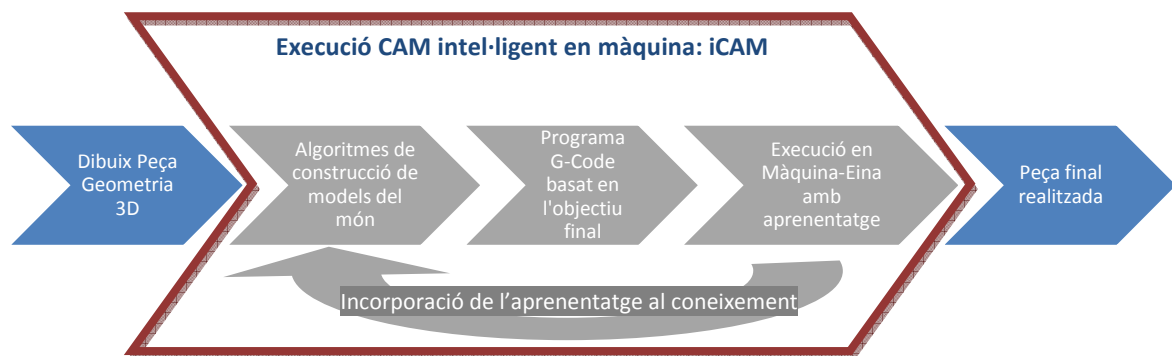


Figura 7.3-1. Possible procés d'obtenció d'una Peça mitjançant un processador intel·ligent CAM en màquina (proposta *iCAM*)

En contraposició amb el procés d'obtenció d'una peça que es du a terme actualment, la proposta del sistema anomenat CAM intel·ligent es compon de tres mòduls interconnectables d'interfície que tenen com a objectiu:

- i) la generació de models del món,
- ii) la generació del programa G-code per a l'obtenció del resultat desitjat i
- iii) l'execució en màquina-eina del programa generat, amb consciència i interpretació dels canvis de l'univers format per la màquina-eina i el seu entorn; tot incorporant-los al coneixement del sistema per tal de fer-los servir en les noves generacions de G-code

Un sistema *iCAM* com el prescrit podria ser materialitzat per un fabricant que controlés tota la cadena de valor (CAM-CNC-Màquina), si bé amb un esforç de desenvolupament important. Altrament, també hauria de ser factible en règim de codesenvolupament entre diferents fabricants de CAM, controls numèrics de màquines i màquines-eina, si bé requeriria formalitzar aliances estratègiques fortes ja que iniciaria una línia de desenvolupament de sistemes de fabricació conceptualment molt diferent de l'actual.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Finalment, com a camí de desenvolupament més natural dels sistemes iCAM, s'apunta la creació de sistemes de CAM intel·ligents a través de les comunitats de creadors obertes i sense ànim de lucre: els “*Makers*” (veure apartat a continuació); doncs es considera que tant per capacitat com per filosofia i motivació podrien dur a terme projectes de repte tecnològic que consolidin canvis de paradigma alineats amb altres desenvolupaments actuals.

7.3.2. El món tancat s'està acabant: els “*Makers*” i la comunitat oberta

El nivell de vida de la societat occidental ha propiciat que s'hagi conformat tot un estrat social format per persones amb força temps d'oci i un nivell de formació elevat (sovint amb titulacions universitàries superiors). Els motius de la seva ociositat són molt diversos; alguns són persones jubilades amb salut i per tant amb molt temps lliure. D'altres són gent de totes les edats (treballadors i/o estudiants), que dediquen el seu temps no laboral a desenvolupar activitats creatives (de l'estil bricolatge o *DIY* –de l'anglès “*Do It Yourself*”-) sense un afany lucratiu concret.

D'aquesta manera, s'ha creat el que alguns anomenen una nova “*cultura tecnològica contemporània*” marcada per interessos orientats a l'enginyeria com l'electrònica, la robòtica, la impressió en 3D, l'ús de màquines-eina controlades per ordinador o fins i tot la forja o el treball de la fusta. L'objectiu dels membres d'aquesta comunitat, comunament anomenats “*Makers*” [83], és aplicar aquestes tecnologies a la invenció de productes i l'obtenció de prototips; tot emfatitzant el seu aprenentatge i ús pràctic de cara a la seva aplicació de forma creativa (Veure Figura 7.3-2).

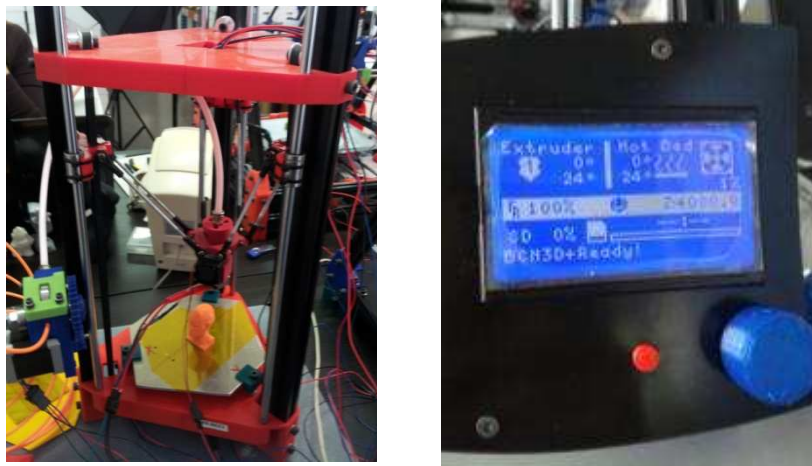


Figura 7.3-2. Esquerra: Impressora 3D mitjançant tecnologia FDM en arquitectura “Delta” muntada a partir de dissenys obtinguts de manera lliure i gratuïta a Internet. Dreta: Pantalla de visualització LCD Gràfica d'una impressora BCN3D+. Font: Fundació CIM.

Però si hi ha algun tret específic que caracteritza el moviment dels *Makers*, aquest és el seu treball en xarxa, de manera col·laborativa. Quan un *Maker* fa un nou disseny, no l'amaga, ni el guarda, ni el protegeix: el fa públic a la comunitat i en dóna tots els detalls. Així doncs, tota la comunitat és lliure per utilitzar-lo. De fet, quan algun altre membre de la comunitat l'utilitza, normalment també ho fa públic i li dóna les gràcies al primer. Però el més important és que en

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

ser utilitzat i adoptat per la comunitat, el nou disseny també té la oportunitat de ser millorat i evolucionat, de manera que un temps després, el creador original pot tornar a fer servir el seu disseny però amb prestacions millorades i noves funcionalitats.

Aquesta filosofia de treball rep el nom de “*Open Source*” (Codi obert), en les seves vessants “*Open Source Software*” i “*Open Source Hardware*” (relatius al programari i maquinari). Aquests codis oberts solen estar disponibles en diversos formats per a que puguin ser editats de manera senzilla i per a que s’hi puguin fer modificacions directament sobre la font. Potser una de les característiques més curioses és que el Codi Obert no posa cap traba a la comercialització de productes basats en ell; sinó que en molts casos el vector comercial és un dels mecanismes de la comunitat de contribuïdors per generar recursos per a desenvolupar el projecte comunitari. D’aquesta manera, el Codi Obert dóna la llibertat d’evolucionar col·lectivament la tecnologia mentre es comparteix el coneixement.

Els espais de trobada de la comunitat *Maker* són tant físics com virtuals. En efecte, els repositoris d’Internet constitueixen una eina potentíssima per vehicular dissenys i experiències, així com també els fòrums, blogs i pàgines dedicades. D’altra banda, també se cerquen espais d’interacció en viu a través d’un nombre creixent de fires i esdeveniments, com per exemple les grans *MakerFaires* –més de 120.000 assistents a l’edició de 2012- (organitzades regularment als Estats Units des de 2006 i amb una primera edició Europea a Roma el 2013 i una primera asiàtica a Tokyo també el mateix any) o també les petites *MiniMakerFaires*, de les que se n’organitzen centenars a un nivell més local en molts països diferents.

En aquest context, paradigmes com els presentats per solucions com el CAM intel·ligent, que obren un ventall de desenvolupament enorme, amb possibilitat d’incorporar moltes funcionalitats, però que a més necessiten la comunicació entre diferents sistemes són el cultiu ideal per ser desenvolupats per comunitats de treball en xarxa sense ànim lucratiu. Desenvolupar sistemes d’iCAM en codi lliure i obert per tal que siguin utilitzats per la comunitat és doncs la millor manera de no bloquejar el desenvolupament al caprici de multinacionals i també de fer possible que els usuaris finals tinguin la versatilitat necessària per materialitzar els seus dissenys.

Aquest tipus de col·laboració, que s’espera que tingui un llarg recorregut, ja s’ha començat a realitzar des de la Fundació Centre CIM que cada cop està integrant-se més en el moviment *Maker* i per exemple ha estat present a les fires *MakerFaire* de Roma i *TCT Birmingham* de 2013 presentant el projecte d’impresora domèstica BCN3D+. En matèria de sistemes de fabricació intel·ligents, el desenvolupament d’aquestes impressores basades en tecnologia de deposició de fil fos (FDM – Fused Deposition Modelling o FFF – Freeform Filament Fabrication), s’està abordant amb la col·laboració de tota la xarxa, i especialment amb l’italià *Alessandro Ranellucci* (veure *Annex 5 - Sistemes de fabricació intel·ligent lliures i oberts*), arquitecte –en el doble sentit- de la solució de generació de línies de G-Code de codi lliure i obert anomenada “*Slic3r*”.

7.3.3. Extensió a altres topologies: La democratització dels sistemes de producció

De la mateixa manera que els *Makers* són usuaris de moltes tecnologies de fabricació diferents (impressores 3D però també robots, torns, fresadores, útils de tall i conformat, etc), l’ús de

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

controls per computador intel·ligents no hauria de ser patrimoni només de les impressores en 3D, sinó que l'iCAM hauria de ser desenvolupat i aplicat tenint en compte la varietat de topologies de màquina i de processos de fabricació als que podria ser aplicat.

En efecte, la consecució d'una impressora en 3D controlada en els eixos X, Y i Z que incorpori un quart eix al capçal per controlar l'avanç del fil de plàstic per a ser extruït, no dista gaire de la topologia necessària per a implementar una màquina de tall per làser (el capçal seria substituït per un feix de llum i un mirall) o bé d'una petita fresadora (substituint el capçal per una petita eina de treball domèstic tipus *Dremel*).

Els *Makers* són, per tant, una comunitat de treball en xarxa i de nombre creixent que s'emocionen creant i desenvolupant productes nous. No obstant, no són artesans que fan de la fabricació una afició manual, sinó que comencen els seus productes per la fase de visualització i disseny digital. Dit d'altra manera, són fabricants en potència que sempre generen un dibuix en 3D, que és susceptible de ser utilitzat per un sistema de fabricació integrat per ordinador (Veure Figura 7.3-3).



Figura 7.3-3. Peces de fusta tallades i gravades amb làser domèsticament per personal de la Fundació CIM. Font: Cortesia de Gerard Mosquera.

Aquest factor és important, doncs la creació de continguts digitals de dissenys propis fomenta la demanda de sistemes de fabricació digitals a baix cost per a petites quantitats: no val tenir una fàbrica molt econòmica a l'Àsia llunyana si la demanda vol articles personalitzats en quantitats molt baixes (quasi sempre unitàries). Per a respondre a aquest tipus de demanda es necessiten sistemes de producció domèstics (o com a molt, d'ús compartit a través de xarxes com ara la *3DHubs*^[84] que posen en contacte a usuaris de sistemes d'impressió que poden ser domèstics), que conseqüentment, han de tenir un cost d'adquisició o fabricació molt reduït (molts equips són fabricats i muntats pels propis usuaris).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Aquest fenomen, que es pot classificar com a *democratització dels sistemes de producció*, combinat amb el desenvolupament de nous sistemes productius, ha de facilitar en un futur pròxim que els sistemes de producció a nivell domèstic estiguin dotats cada cop més d'interfícies intel·ligents i que siguin més habituals, de manera que en un futur no massa llunyà es considerin els bens d'equip produïts per a la fabricació d'objectes com electrodomèstics comuns a totes les cases.

Aquests electrodomèstics faran coses diferents de les que fan comunament els electrodomèstics actuals (rentar roba o plats, conservar o processar menjar...) i passaran a fabricar en local tot allò que els usuaris vulguin en cada moment: des d'un joc de taula en plàstic a un plat o got de ceràmica, des d'una peça de roba a un pastís o fins i tot peces metàl·liques per a que el propi usuari pugui fabricar nous electrodomèstics. La revolució que suposarà la implantació dels *Sistemes de Fabricació Personal* a les cases tindrà un impacte comparable al que va tenir l'entrada de l'*Ordinador Personal* a les llars a la dècada dels vuitanta.

De fet, en el mig termini, l'entrada d'aquestes arquitectures provocaran canvis en alguns dels electrodomèstics. Per posar un exemple, amb l'envelliment progressiu de la població aflorarà una nova demanda d'equips que permetin fabricar àpats llestos per a ser consumits que no calgui mastegar però que mantinguin les propietats i qualitats dels aliments convencionals. En aquesta direcció, les cuines canviaran els forns i les neveres tradicionals per centres de processat de menjar calent i menjar fred.

Els manuals per a la utilització dels nous equips estaran disponibles a Internet de manera gratuïta i tindran traducció automàtica a tots els idiomes. De fet, no caldrà llegir les instruccions ja que es podran consultar una sèrie d'avatars virtuals que facilitaran l'aprenentatge de l'ús de les noves tecnologies i millores constants. Els models 3D de les peces a fabricar podran ser dibuixats pels clients, però en la majoria de casos n'hi haurà prou amb descarregar models ja validats i esmerçar el temps en la personalització del producte a partir de variables suportades dins la gama existent. De fet, les games de producte possible seran tan àmplies que difícilment es produiran dues peces idèntiques en cap lloc del globus.

S'adoptarà una nou rol en la cadena de subministrament formada pels "*prosumidors*" fruit de la combinació dels "*productors*" i els "*consumidors*". Els dissenyadors deixaran de treballar únicament per a una sola empresa i abocaran el seus continguts a la xarxa. La logística canviarà enormement, doncs es deixarà de fer enviaments de producte final per passar cada cop més a realitzar enviaments d'informació i de matèries primeres. A més, els propis sistemes d'emmagatzematge (armaris, embalatges) també seran elements conscients i manifestaran en tot moment el seu estat (buit, ple, mitja càrrega). Com que disposaran de connexió a Internet, podran realitzar ells mateixos les comandes de forma predictiva, de manera que no existeixin ruptures d'estoc.

En el moment de culminar el present treball és excitant poder viure l'època en que la democratització dels sistemes de producció canviarà els hàbits de consum a nivell mundial: els clients ja no seran simples compradors, sinó elements clau en la decisió de la cadena de subministrament. Donaran un nou rol a les matèries primeres i a la planificació de processos productius, i seran capaços de fabricar exactament en el punt i moment en que es produeixi la demanda (Veure Figura 7.3-4).

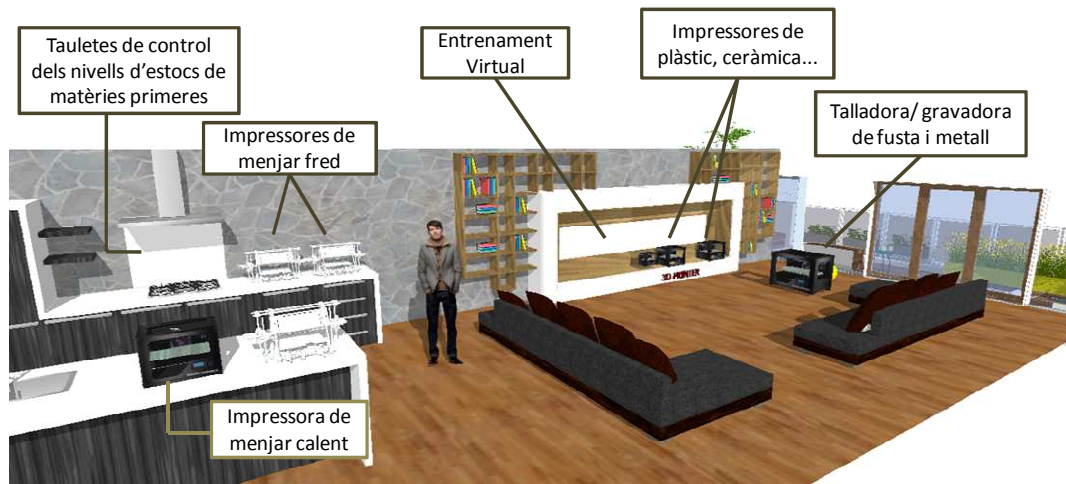
Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Figura 7.3-4. Democratització dels processos de producció: La casa canvia de paradigma per convertir-se en fàbrica i els electrodomèstics donen un salt disruptiu respecte a les tecnologies i els usos als quals són destinats. Font: Cortesia de Marta Martínez.

TESI DOCTORAL:

Contribució als algorismes de construcció de models del món per a la implementació en Arquitectures Àgils de Fabricació

ANNEXOS

Annex 1. Suport informàtic per a l'Aplicació de l'algoritme de Gomà i Vivancos

L'aplicació del model lògic de Gomà i Vivancos per a la construcció de Models del Món, pot realitzar-se en sistemes senzills sense necessitat de realitzar cap modelització informàtica. Malgrat això, a mesura que augmenten el nombre de sensors i accionaments en els sistemes, augmenten el nombre de files i columnes de les taules (Funcions de canvi d'estat) i per tant és recomanable realitzar-les mitjançant algun tipus de programació, si bé senzilla.

Aquest fet és especialment destacable quan es va augmentant l'ordre de la classe dels objectes a detectar, que va incrementant el nombre de dades i complicant els experiments a realitzar.

Per aquest motiu, l'apartat a continuació descriu el funcionament d'una petita aplicació desenvolupada mitjançant la programació de petites Macros senzilles dins de fulls de càlcul en l'entorn de *Microsoft® Excel®*.

A1.1. Modelització de sistemes mitjançant eines de programació

La manera de dur a terme la modelització va ser programar els petits elements de codi necessaris per a realitzar els experiments en petites macros i anar enregistrant els resultats obtinguts en un full de càlcul; de manera que una pestanya de l'arxiu conté tots els experiments realitzats per a cadascun dels sistemes modelitzats al Capítol 3.

Els fulls de càlcul exposen els experiments i els valors utilitzats, alguns trobats a partir de les macros ressenyades. A l'apartat de nomenclatura es mostra part del codi utilitzat tant en l'arxiu *.xls* com en aquest document. Per a cada experiment, s'exposen les variables implicades, ajuntades convenientment per a poder avaluar-les correctament, i alguns indicadors. Hi ha indicadors que utilitzen les macros que troben els valors de les variables de sortida per assegurar-se que els conjunts de valors únics són, efectivament, únics. També hi ha indicadors per assegurar la condició que implica la classe d'un objecte. Les condicions es miren per als experiments realitzats prèviament a l'actual.

L'estructura de cada full és la següent. Es mostren els diferents passos d'esquerra a dreta i, per a cada pas, el seu desenvolupament es fa cap avall. Primer es mostren els objectes suposats, i els experiments inicials amb una primera determinació. Per als següents passos es mostra primer els objectes suposats, trobats o rebutjats, i seguidament una taula d'experiments, que consta del nombre d'experiment, les variables que han de ser diferents per a cada experiment, i els indicadors.

Les macros estan incloses a l'arxiu *.xls*. N'existeixen tres d'accessibles i una altra que és una funció que és cridada per les altres. La primera "*Exp_cl_1_3*" s'utilitza per a determinar els valors de les sortides dels experiments per a determinar els objectes de 1^a i 3^a classe. La segona, "*Exp_cl_1_3_quick*" és com l'anterior, però s'atura en cas que trobi que cap variable d'entrada compleix cap condició de classe per als objectes; la diferència en el seu ús és que, tot

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

i que la primera triga més temps, determina tots els valors possibles de les variables que no es vinculen a objectes i, per tant, és necessari utilitzar-lo per a assegurar bé la recerca dels objectes de 2a i 4a classe. La tercera macro, "*Exp_cl_2_4_quick*", és com la segona, però s'utilitza per a trobar objectes de 2^a classe enlloc dels de 1^a i 3^a. La funció "*CalculaNext*" serveix per establir l'ordre d'assignació dels diferents valors de les variables de sortida que, en principi, és segons el codi Gray invertit, ja que és el que s'ha trobat que repeteix menys iteracions amb aquests exemples.

Donada la necessitat de simplificar els caràcters utilitzats dins del full de càlcul, per a aquesta aplicació es realitza una petita adaptació de la nomenclatura utilitzada per als experiments, segons el criteri següent:

- E: Sensors, són directament els valors de les variables d'entrada de l'algorisme
- S: Accionaments, són directament els valors de les variables de sortida
- O: Objectes, ja siguin trobats o suposats
- e: Variables d'entrada a l'instant anterior
- o: Objectes a l'instant anterior

i) Exemple de programació d'experiments particularitzat al cas 1 de Mecanisme de Pistó i Electroimant

- **Objectes inicials (1^a o 3^a Classe): Cal suposar un objecte per a cada variable de sortida (senyal de consigna als accionaments) que disposi el sistema**

En primer lloc, es realitza una etapa d'experimentació inicial per obtenir una primera idea de quins objectes poden trobar-se en el món, que s'anomenen "*Experiments Inicials*". D'aquests experiments inicials cal realitzar-ne per a cada valor possible de les variables de sortida.

Donat que en el Mecanisme de Pistó i electroimant el nombre de variables de sortida és $S=2$, se suposen dos Objectes inicials amb $N=2$ valors possibles cadascun. Per tant, fent $N^S=2^2=4$, caldrà realitzar 4 experiments inicials.

Fent operacions XOR entre els valors dels experiments tals que una variable de sortida específica no varia, es troba si aquesta variable influencia alguna variable d'entrada. En principi, l'entrada és influenciada per la sortida específica si, per a totes les parelles d'experiments on aquesta sortida no varia, el valor de l'entrada sempre és 1.

En qualsevol cas, aquesta primera experimentació no proporciona valors definitius, sinó que tal com demostra l'exemple del pistó i l'electroimant utilitzat, aquesta condició es pot confirmar per casualitat en tots els objectes sense que tots els objectes trobats en aquest primer pas compleixin les condicions de primera classe, si bé proporciona una primera aproximació.

En segon lloc es realitza el primer conjunt d'experiments per detectar els objectes de 1^a i 3^a classe. En aquest cas, caldrà fer un experiment per a cada estat actual, conjunt de variables de sortida i estat de procedència (que són els elements que tindran influència en els estats de les classes que s'està tractant d'identificar).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

D'aquesta manera, en aquest cas es té un experiment per a cada valor de 3 conjunts d'estats diferents ('S', 'O' i 'o') amb $N=2$ valors possibles cadascun (doncs es tracta de variables binàries) i per tant, $N^{(2+2+2)}=2^6=64$ experiments necessaris.

Per tal de comprovar si un objecte és de 1^a Classe, caldrà comprovar que l'entrada (resposta rebuda pels detectors) només depèn únicament del valor pres per les sortides (valors presos pels accionaments), sense importar el valor que prenia aquesta variable en l'estat actual o previ. Si no es compleix aquesta condició, és a dir, si el valor no és sempre el mateix indistintament del valor que prenia aquesta variable en els altres estats, l'objecte trobat no podrà ser de primera Classe.

A nivell matemàtic, això suposa que el nombre de vegades que apareix el valor de les variables de sortida ha de ser igual al de la unió d'aquest mateix valor i el de la variable d'entrada a avaluar.

D'altra banda, per tal de comprovar si un objecte és de 3^a Classe, caldrà assegurar que una entrada (resposta rebuda pels detectors) només depèn únicament de l'estat actual i del valor de les sortides (valors de consigna dels accionaments). Així doncs, per a cada conjunt de valors iguals de les variables d'estat i les variables de sortida (sense importar l'estat previ), el seu valor ha de ser sempre el mateix, o es tractarà d'un objecte que no compleix la condició necessària per ser de tercera Classe.

A nivell matemàtic, això suposa que el nombre de vegades que apareix el valor dels estats a l'instant actual i de les variables de sortida ha de ser igual al de la unió d'aquest mateix valor i el de la variable d'entrada a avaluar.

- **Objectes posteriors (de 2^a o 4^a Classe): Cal suposar un objecte per a cada variable d'entrada (senyal de detector) no vinculada a cap objecte ja trobat**

En primer lloc és important realitzar una comprovació prèvia doncs és possible que en certs conjunts de valors de les variables d'entrada no siguin abastables o possibles. Per tant, cal determinar aquests conjunts a partir dels experiments fets prèviament. En el full de Càlcul de l'experimentació es recull aquesta comprovació en una darrera columna del bloc que avalua els objectes de 3^a classe.

Un cop s'ha fet aquesta comprovació, els objectes no identificats en els experiments anteriors s'han de comparar amb els seus estats anteriors. En concret, s'han de suposar aquests objectes a partir dels resultats observats en les variables d'entrada no vinculades als objectes ja identificats.

Per a fer-ho es realitza 1 experiment per a cada conjunt de variables de sortida i estat de procedència de tots els objectes (identificats i suposats); per tant, a l'exemple es tracta de realitzar 1 experiment per a cada valor de 2 conjunts, (1 conjunt de 'o'=3 estats i 1 altre conjunt amb S=2 estats), amb $N=2$ valors possibles que fan un total de $N^{o+S}=2^{3+2}=2^5=32$ experiments.

La condició per ser objectes de 2^a Classe respon a comprovar que el seu valor només depèn del valor pres per ell mateix a l'instant previ i a les variables de sortida (accionaments). Així

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

doncs, per a cada conjunt de valors iguals d'ell mateix a l' instant previ i de les variables de sortida (sense importar els valors dels altres objectes), el seu valor haurà de romandre constant o no es podrà considerar objecte de 2ª Classe.

Matemàticament, això suposa que el nombre de vegades que apareix el valor de l' estat a avaluar a l' instant previ i el de les variables de sortida ha de ser igual al de la unió d'aquest mateix valor i el de l' estat a avaluar a l' instant actual.

Finalment, els objectes no identificats fins al moment seran considerats de 4ª Classe i estaran vinculats a cadascuna de les variables d'entrada (senyals) no vinculades amb cap altre objecte prèviament. Es pot realitzar una tanda d'experiments per comparar el nombre de vegades que apareix el valor de tots els estats a l' instant previ i de les sortides amb aquests dos valors juntament amb el de l' estat actual a avaluar; però no aportarà cap informació suplementària doncs aquesta condició sempre es satisfarà pel fet de tractar-se d'un experiment en el temps actual.

La concepció i programació d'aquestes macros va poder ser feta en el marc dels treballs de la Xarxa de Referència en Tècniques Avançades de la Producció (XaRTAP) a finals de l'any 2008, gràcies a la col·laboració amb l'Institut de Robòtica Industrial i en concret del becari Albert Ambrós. L'aparença dels càlculs dins el full de càlcul és la que es mostra en la Figura A1.1-1.

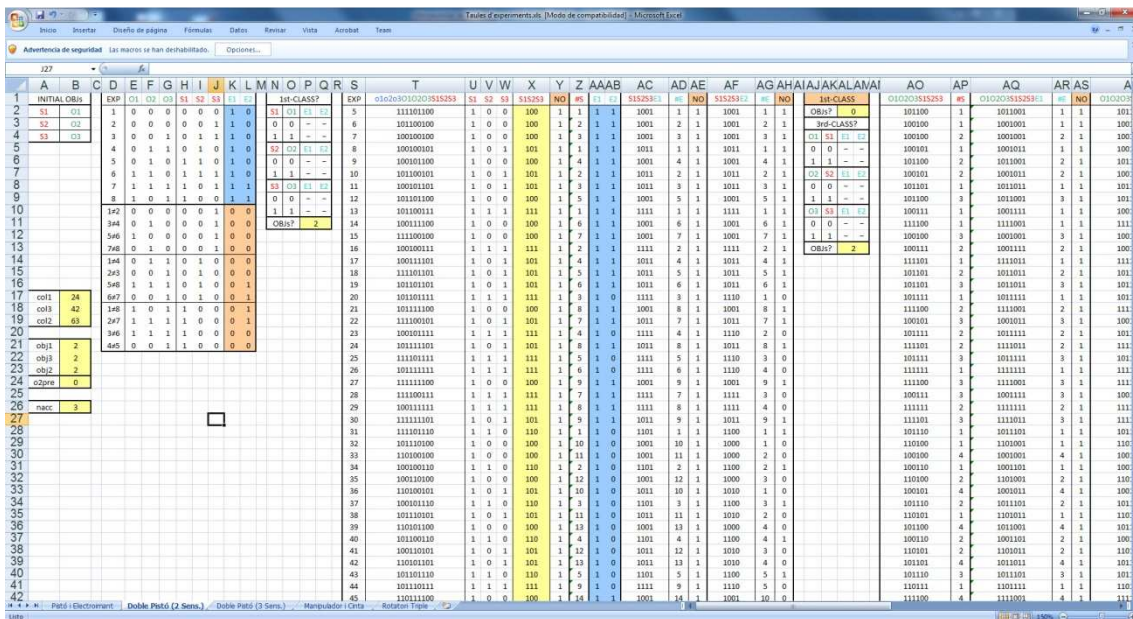


Figura A1.1-1. Captura de pantalla de d'una de les pestanyes del full de càlcul per a avaluar el comportament de sistemes segons el model de Gomà i Vivancos.

Annex 2. Continguts i utilització del Programari “Espai d’Estats”

A2.1. Principals funcionalitats pràctiques del programari

Per tal de posar en context els algorismes especificats en la present Tesi Doctoral, s’ha volgut programar una plataforma d’experimentació anomenada “Espai d’Estats” que s’ha dut a terme mitjançant el programari *Microsoft® Visual Studio®*. Aquesta plataforma, ja introduïda al llarg dels Capítols 4 i 5, pretén ser una primera interfície d’aplicació dels models lògics de cara a ser introduïts posteriorment en els sistemes de Control d’Arquitectures Àgils de Fabricació i de manera particular en desenvolupaments ulteriors que es puguin dur a terme mitjançant sistemes de programari lliure.

Els apartats a continuació recullen la informació més rellevant de la implementació pràctica a “Espai d’Estats” dels algorismes presentats per a la obtenció de Models del Món i la seva aplicació per a la Execució de Tasques, juntament amb els aspectes més importants de la fase prèvia necessària relativa a la Configuració de Paràmetres del Món que es vol modelitzar de manera informatitzada.

A2.1.1. Configuració de Paràmetres

El primer que cal fer abans de posar en funcionament l’execució dels algorismes és omplir tots els paràmetres necessaris a Finestra de *Configuració* (Veure Figura A2.1-1).

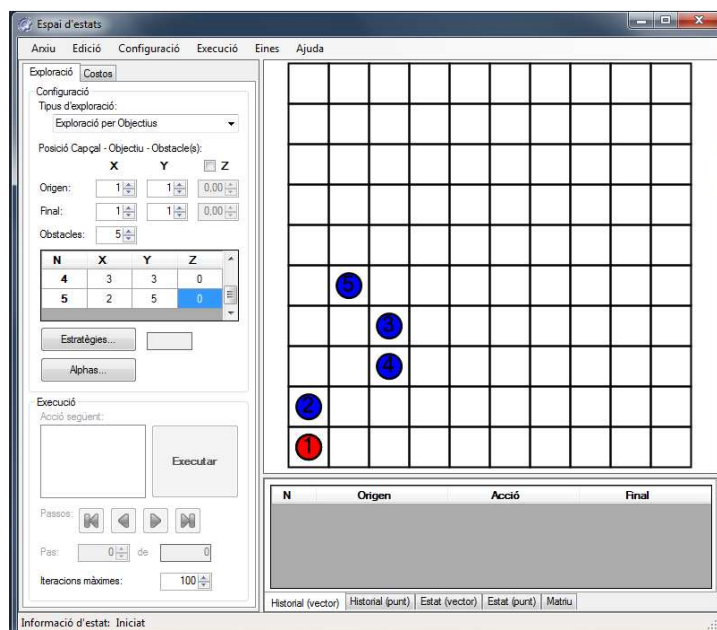


Figura A2.1-1. Captura de pantalla de conjunt de la plataforma d’experimentació “Espai d’Estats” en plena etapa de definició de la Configuració de Paràmetres del Món.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Els paràmetres que cal determinar a la finestra de *Configuració* permet escollir:

- i) *Mida del Món*: Mida de la dimensió de les variables 'M' i 'N' (discretes) i rang de 'P'. Implícitament, aquesta decisió determina si el Món tindrà dues o tres dimensions. Dissortadament, la representació gràfica en taulell no permet més de 3 dimensions simultànies i està dissenyada per a mostrar els eixos 'x' i 'y' amb variables binàries i l'eix 'z' amb una variable contínua.
- ii) *Tipus d'exploració a realitzar*: *Exploració Lliure* (el sistema explora de manera exhaustiva totes les accions en cadascun dels estats – fins al límit d'iteracions màximes permeses), *Exploració per Objectius* (només es marca un Origen i Final i el sistema explora fins arribar al final) i *Exploració per Usuari* (l'usuari decideix en cada moment quina consigna d'accionament vol aplicar).
- iii) *Posició Inicial del Capçal*: És a dir, Estat Inicial del sistema $\{E_0\}$, en coordenades 'x', 'y' i 'z' (si s'escau). Si es realitza una Exploració per Objectius, també la *Posició Final desitjada del Capçal* (és a dir, Estat Final $\{E_f\}$) especificada de la mateixa manera. La Posició Inicial és representa amb un cercle vermell i la final amb un cercle verd.
- iv) *Nombre d'obstacles i posició d'aquests*: També definits per les seves coordenades 'x', 'y' i 'z' (si s'escau) i representats mitjançant punts blaus.
- v) *Estratègia Exploratòria* a adoptar (llevat del cas *Exploració per Usuari*, on l'usuari és lliure de fer en cada moment el moviment que decideixi). Es tracta de la seqüència d'actuació de les diferents consignes als accionaments $\{\alpha_i\}$ per a la seva utilització en Exploracions del Món.
- vi) *Senyals de consigna dels accionaments $\{\alpha_i\}$* : En el cas de taulell de dues dimensions $\{\alpha_1\}=\{0,0\}$, $\{\alpha_2\}=\{1,0\}$ i $\{\alpha_3\}=\{0,1\}$.
- vii) *Tractament de les fronteres*: Habilitació o no de connectivitat entre finals de recorregut d'eixos.

Un cop aquests paràmetres estan correctament definits, pot passar a iniciar-se l'Etapa d'Exploració inicial del Món.

A2.1.2. Etapa d'Exploració del Món: Construcció de Models del Món inicials

L'Etapa d'Experimentació inicial del Món pot ser duta a terme de manera automàtica (en el cas d'Exploracions Lliure o per Objectius) o guiada per l'usuari mitjançant els botons de navegació que permeten anar endavant o endarrere segons els cops de rellotge de la simulació (en qualsevol dels tres casos).

L'únic paràmetre que cal definir és el Nombre d'iteracions màximes a realitzar en aquesta etapa. Aquest número és el nombre màxim d'iteracions que es realitzaran en el cas d'Exploració Lliure i també fa de cota superior de nombre d'iteracions en els altres dos tipus d'exploració (en cas que les exploracions no s'acabessin abans).

Un cop tot està definit, per activar l'inici de l'algoritme cal prémer el botó "Executar", el qual posa en funcionament la experimentació i aprenentatge per part del sistema sobre el funcionament del món. Els diferents punts de pas i estats es van emmagatzemant de manera numèrica a la finestra d'Historial (Finestra inferior dreta). A més, un cop els diferents llistats estan recollits a les pestanyes corresponents -*Historial (Vector)*, *Historial (Punt)*, *Estat (Vector)*,

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Estat (Punt), Matriu-, si l'usuari selecciona algun Estat que es trobi en alguna de les files escrites, la finestra de representació gràfica recollirà en el seu taulell 2D o 3D quin és aquell estat concret tal i com es mostra la Figura A2.1-1).

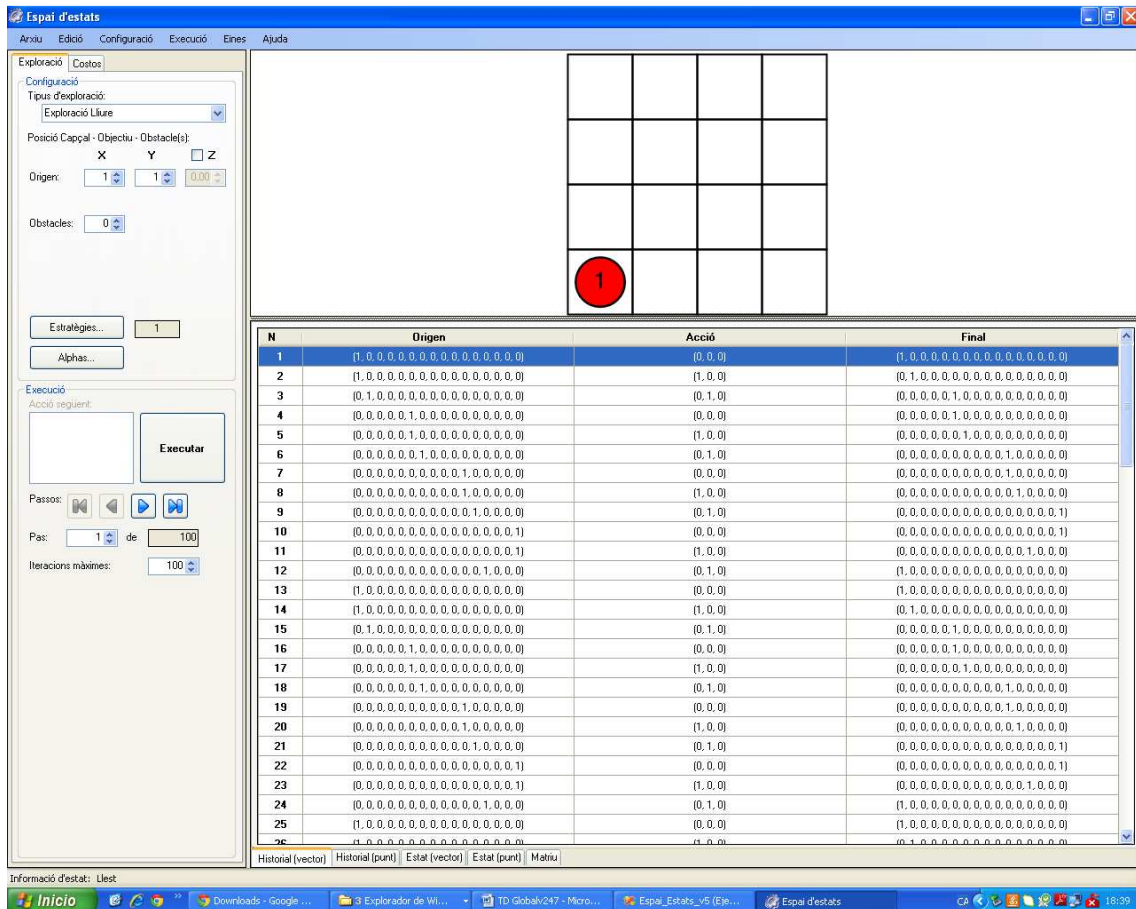


Figura A2.1-2. Captura de pantalla de conjunt de la plataforma d'experimentació "Espai d'Estats". A la Finestra d'Historial (inferior dreta) es pot consultar la representació numèrica dels canvis d'estat generats.

Un cop s'ha completat amb èxit una exploració del Món i per tant es té un Model inicial del Món $[\Omega]$, el sistema està llest per emprendre l'Etapa d'Execució de Tasques.

A2.1.3. Etapa d'Execució de Tasques: Resolució de casos aplicant i millorant els models lògics

Un cop realitzada una primera exploració del Món, el sistema ja té els paràmetres considerats com a Model del Món $[\Omega]$, a saber: Llista d'accions possibles $\{\alpha\}$, Funcions de percepció $\{S\}$, Llista d'estats possibles $\{\xi\}$ i Funcions de canvi d'estat $\{F\}$.

De cara a realitzar l'Etapa d'Execució de Tasques, cal consignar els paràmetres següents a la finestra de *Configuració*:

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

- i) *Posició Inicial del Capçal*: És a dir, Estat Inicial del sistema $\{E_{02}\}$, en coordenades 'x', 'y' i 'z' (si s'escau). La Posició Inicial és representa amb un cercle vermell a la Finestra de Representació del Món
- ii) *Posició Final desitjada del Capçal*: És a dir, Estat Final $\{E_f\}$ especificat de la mateixa manera que l'anterior. La Posició Final és representa amb un cercle verd a la Finestra de Representació del Món
- iii) *Estratègia de Resolució* a adoptar. Igual que a l'Etapa anterior es tracta de la seqüència d'actuació de les diferents consignes als accionaments $\{\alpha_i\}$ per a la seva utilització en Exploracions del Món.
- viii) *Ponderació en pes específic per als Costos de cadascun dels Senyals de consigna dels accionaments $\{\alpha_i\}$* : En el cas de taulell de dues dimensions $[\alpha]=\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$, es tenen tres pesos diferents $\{\rho\alpha\}=\{\rho\alpha_1, \rho\alpha_2, \rho\alpha_3\}$.
- iv) *Nombre màxim d'iteracions a realitzar*: Límit d'iteracions màximes permeses per a la resolució de l'Execució de Tasques.
- v) *Habilitació/Deshabilitació de Prejudicis Lògics*: L'usuari pot decidir si s'aplica algun tipus de prejudici (Inferència Associativa i/o Abstracció per analogia respecte a Funcions de Canvi d'Estat i Completesa Ontològica per a Estats no visitats) o si no se n'aplica cap per poder comparar els diferents models obtinguts.

Alguns aspectes ressenyats en la Etapa d'Exploració com ara la *Mida del Món*, el *Nombre d'obstacles i posició d'aquests*, el *tractament de les forneres* i l'*especificació de les Senyals de consigna dels accionaments* es consideren invariants en el Món i per tant es mantenen constants respecte a l'Etapa anterior.

Un cop l'usuari decideix executar la Etapa d'Execució de Tasques amb la configuració desitjada (botó "Executar"), igual que a l'Etapa anterior, la representació dels resultats dels experiments realitzats es realitza sempre de manera numèrica amb taules senzilles endreçades a les pestanyes de la part inferior dreta de la finestra d'Historial. Els diferents punts de pas i estats es van emmagatzemant de manera numèrica a la finestra d'Historial (Finestra inferior dreta) on queden recollits a les pestanyes corresponents -*Historial (Vector)*, *Historial (Punt)*, *Estat (Vector)*, *Estat (Punt)*, *Matriu*-. A més, en una altra filera de pestanyes, apareix la informació sobre els camins realitzats i la informació dels costos de cadascuna de les solucions abordades.

D'altra banda, si l'usuari selecciona algun Estat d'alguna de les files escrites, la finestra de representació gràfica mostra la imatge de l'estat 2D o 3D segons convingui. Els botons de navegació, permeten d'una banda realitzar la simulació pas a pas i en tot moment seguir la seqüència de resultats obtinguts.

A2.2. Estructura d'implementació realitzada

Tot i que la intenció no és comentar amb detall totes les funcions i subrutines implementades en el marc de la Plataforma d'experimentació d'"Espai d'Estats", les Figures a continuació mostren a grans trets de quines etapes es compona la implementació interna de funcions per a la fase de Configuració del Sistema i l'Etapa d'Experimentació inicial (Figura A2.2-1) i Etapa d'Execució de Tasques (Figura A2.2-2).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

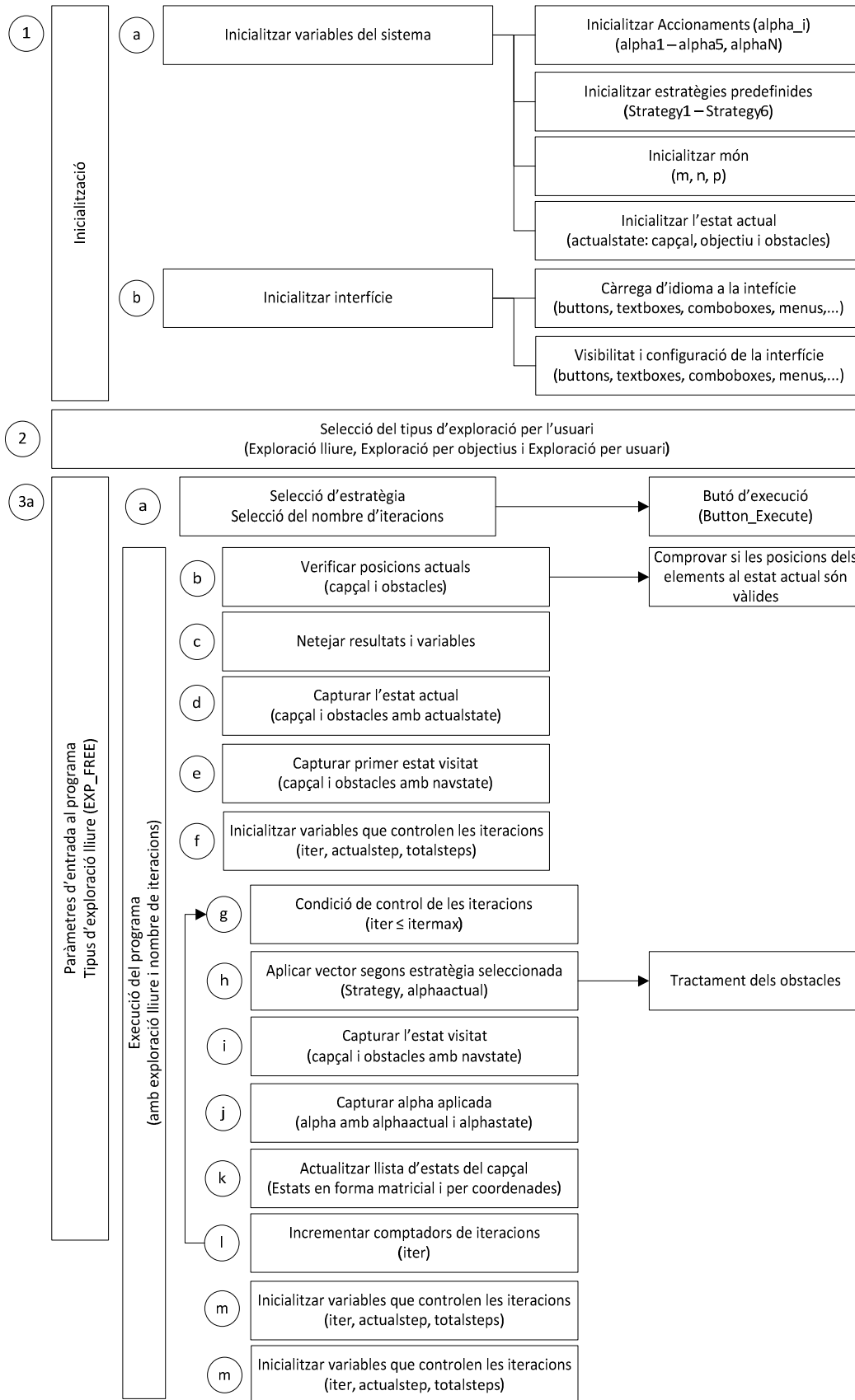


Figura A2.2-1. Implementació interna de funcions de la plataforma "Espai d'Estats" per a la fase de Configuració del Sistema i l'Etapa d'Experimentació inicial.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

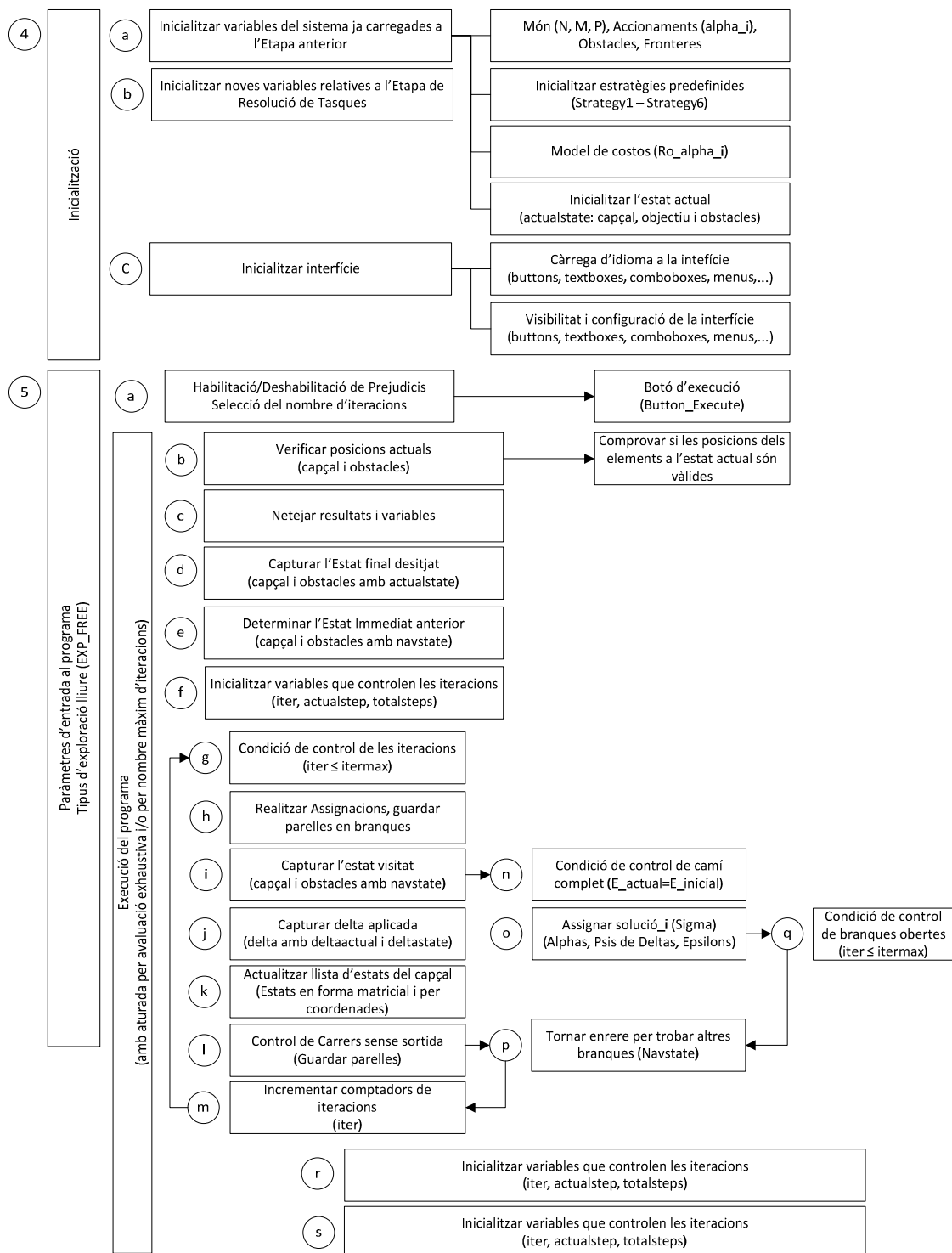


Figura A2.2-2. Implementació interna de funcions de la plataforma "Espai d'Estats" per a l'Etapa d'Execució de Tasques.

A2.3. El Contingut darrere del Programa: Funcionalitats que donen suport a l'aplicació principal

Durant la programació de la plataforma d'experimentació "Espai d'Estats" s'ha fet un esforç important per intentar aconseguir que pugui ser una aplicació en la qual es pugui treballar i fer evolucionar posteriorment. De fet, per aconseguir que una aplicació de programari estigui viva i no acabi en un punt mort, cal aplicar un manteniment continu per assegurar que respon a les necessitats canviants dels usuaris. Aquest manteniment sol ser una última etapa iterativa en la qual es poden corregir errors detectats en el funcionament quan es prova el seu funcionament en casos concrets que no havien estat testejats (o potser ni tant sols previstos) durant el seu desenvolupament inicial. Com es veurà a l'Annex 5, és aquest manteniment lligat a experiències de nous usuaris el que realment amplia les capacitats i millora el rendiment de l'aplicació.

Per aquest motiu, de manera complementària a la programació dels algorismes principals, a l'"Espai d'Estats" s'hi han posat multitud de funcionalitats pràctiques per fer-lo més complet i per donar, a possibles usuaris i interpretadors posteriors, eines útils per a la seva utilització autònoma i desenvolupament ulterior. Les més rellevants d'aquestes funcionalitats es recullen en els apartats a continuació.

A2.3.1. Formulari d'Ajuda

Com s'ha comentat anteriorment, l'aplicació "Espai d'Estats" s'ha desenvolupat de manera senzilla i intuïtiva, procurant en tot moment que l'aplicació dels algorismes especificats sigui lineal amb la seva especificació i casuística.

Malgrat això, tot preveient que els possibles usuaris puguin voler utilitzar la plataforma com una eina per esbrar la potència intrínseca d'aquests algorismes (potser per a una implementació posterior en algun nou cas d'aplicació, per exemple en programari lliure), s'ha incorporat un formulari d'Ajuda –accessible mitjançant la tecla F1 o la pestanya corresponent del Menú Principal- concebut per assistir a l'usuari en tot moment i de manera contextual.

El contingut i l'estructura del formulari d'Ajuda estan inspirats en els formularis comuns que es poden trobar per als diferents programaris més utilitzats, per tal d'aconseguir una utilització natural fins i tot per als nous usuaris. D'aquesta manera, el formulari d'Ajuda és també una manera que l'usuari rebi informació de com funciona l'aplicació (Veure Figura A2.3-1).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

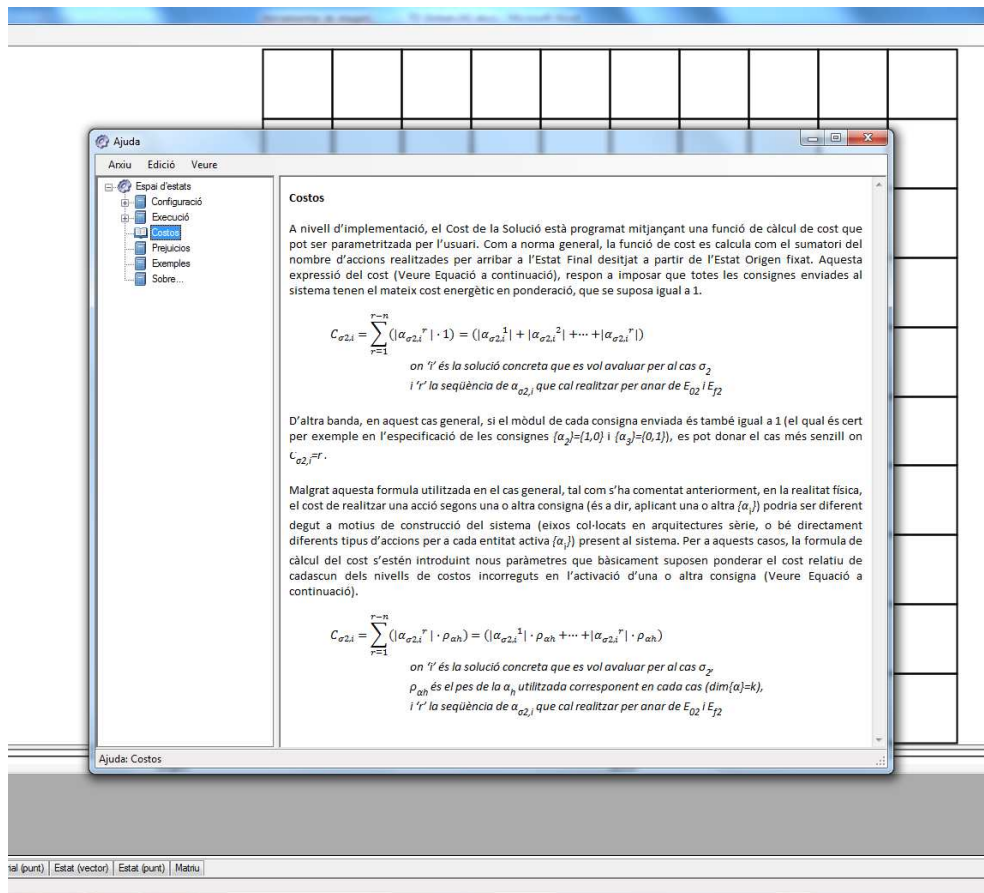


Figura A2.3-1. Captura de pantalla de la Finestra d'Ajuda de la plataforma d'experimentació "Espai d'Estats".

Si bé de moment es tracta d'un formulari "off-line" (fora de línia), el format de la finestra està preparat en extensió '.html' (format web), tot pensant en que en un futur no gaire llunyà pugui cridar a un lloc d'ajuda en línia que podria incloure actualitzacions i millores, així com fer possible una intervenció remota de l'aplicatiu. En qualsevol cas, la utilització d'aquest tipus de format és pràctica pel simple fet que redueix enormement el pes dels arxius a pocs kb i per incloure, si fos necessari, enllaços a llocs externs.

A2.3.2. Importació i Exportació d'Arxius

Per tal de facilitar el tractament de la informació generada a les Etapes d'Exploració i d'Execució de Tasques dels algorismes implementats, l'aplicatiu "Espai d'Estats" permet guardar en fulls de càlcul separats (formats de Microsoft® Excel® com '.xlsx') la representació numèrica dels experiments realitzats, recollida a les pestanyes de la finestra d'Historial del Món.

Aquesta funcionalitat habilitada des de l'opció "Guardar com..." de la pestanya "Arxiu" del Menú principal (o bé cridada amb la combinació "Ctrl+May.+S") genera un full de Càlcul amb la informació endreçada segons les mateixes pestanyes –en el cas de l'Experimentació representada a la Figura A2.3-2: *Historial (Vector)*, *Historial (Punt)*, *Estat (Vector)*, *Estat (Punt)*,

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Matriu- més una altra pestanya que conté els Paràmetres utilitzats en la Configuració específica per al Model del Món utilitzat.

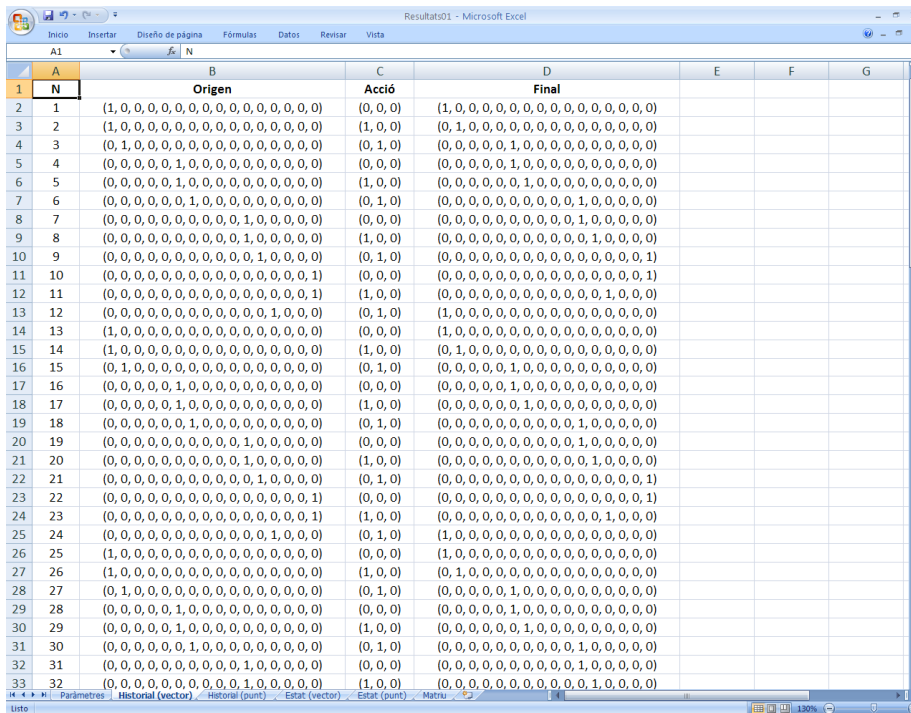


Figura A2.3-2. Captura de pantalla amb un full de càlcul (format .xls) obtingut a partir de l'experimentació mostrada a la Figura A2.1-1 de la plataforma "Espai d'Estats".

A2.3.2. Gestió d'Errors i Excepcions. Depuració del Programa

Amb l'objectiu de poder anar resolent els errors que puguin anar apareixent en l'execució del programa en casos diferents dels analitzats durant la primera implementació del programa, s'ha preparat la Taula mostrada a la Figura A2.3-3 en la qual es pot recollir en files el llistat d'errors de funcionament trobats pels usuaris, que puguin anar-se detectant en les fases de "Beta-testing".

Nom Formulari	Línia	Columna	Tipus d'Error	Missatge d'Advertència o d'Error	Descripció de la possible causa de l'Advertència o de l'Error

Figura A2.3-3. Taula per a la recopilació d'Errors i Excepcions durant l'ús de la plataforma d'experimentació "Espai d'Estats".

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

D'aquesta manera, amb la plantilla corresponent es pot recollir informació específica de forma estructurada sobre el lloc on es detecten els errors (Formulari, Línia i Columna), del seu Tipus i de la seva temàtica (Missatge Aparegut i Descripció de la possible causa).

Respecte al Tipus d'Error o Excepció, es preveuen tres possibilitats diferents que s'hauran d'atacar de la manera més adequada:

- i) Errors de Funció: Alguna funcionalitat implementada no es desenvolupa correctament
- ii) Errors de Contingut: L'aplicació mostra resultats incoherents
- iii) Errors d'Interfície: L'aparença gràfica o representació dels resultats no s'adeqüen a les expectatives

Si bé es podria implementar aquesta funcionalitat de manera automàtica en la utilització del programa (creant un registre de dades amb la informació dels errors ocorreguts), s'ha preferit deixar-ho com un procediment paral·lel donat que molts dels possibles errors (per exemple certs Errors d'Interfície o de Contingut) en molts casos no són visibles ni possibles de detectar des del mateix programari.

Finalment, és important comentar que degut al caràcter exploratori i iteratiu dels algorismes desenvolupats, en tota resolució de casos (Etapas d'Experimentació o d'Execució de Tasques) podria existir la possibilitat de generar bucles infinits o evolucions no convergents. Aquest fet ha estat objecte d'estudi particular i s'ha fet èmfasi en posar condicions de final d'algorisme per a tots els casos en que pogués succeir. Així mateix, s'ha incorporat una caixa de selecció obligatòria, en tots els casos, que determina el nombre d'iteracions màximes per tal d'assegurar que el programa atura el seu funcionament després d'un cert nombre de cops de rellotge. Aquest comptador (Iteracions màximes) està fixat per defecte a un total de 100, límit que pot modificar-se a desig de l'usuari.

D'altra banda, per no haver d'exigir massa capacitat computacional i tampoc provocar una velocitat d'execució massa lenta, s'ha optat per no carregar massa la realització gràfica i per tant mantenir ben senzilla la aparença i continguts.

A2.3.3. Selecció d'Idioma

Donada la vocació internacional del programa i si bé la funcionalitat actual només està plenament desenvolupada en Català, la programació de totes les funcionalitats s'ha fet tenint en compte la possibilitat d'incorporar de manera senzilla fitxers de text amb les traduccions de totes les comandes, textos explicatius i missatges del sistema en diferents idiomes (Veure Figura A2.3-4).

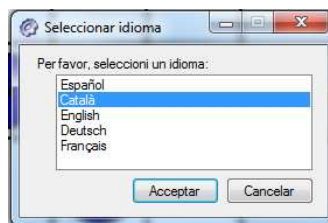


Figura A2.3-4. Detall de captura de pantalla amb la finestra de Selecció d'idioma de la plataforma d'experimentació "Espai d'Estats".

A2.3.4. Incorporació de noves funcionalitats. Desenvolupament ulterior dels algoritmes per part de la Comunitat de programari lliure i obert

Actualment existeixen repositoris virtuals a Internet on la Comunitat de creadors de programari lliure i obert hi dipositen els programes (o “*firmware*”) que van desenvolupant per tal que altres usuaris puguin utilitzar-los i també adaptar-los a les seves necessitats.

Un dels llocs d'Internet més famosos per a l'intercanvi de programari lliure i obert és el portal “*GitHub*”^[85], en el qual es poden trobar milions de allotjaments d'intercanvi de fitxers de codi amb les temàtiques més diverses. Aquests programes, que són totalment gratuïts, són molt utilitzats per posar en marxa aplicacions informàtiques en petits dispositius com ara les plaquetes de “*Raspberry Pi*” o les “*Arduino*”.

Donades les seves característiques (baix cost, capacitat de processat ajustada, possibilitat d'incorporació d'entrades i sortides i connexió a Internet sense fils), els dispositius d'aquest tipus són utilitzats específicament en multitud d'aplicacions de processos de fabricació digital. Més concretament, els dispositius de tipus *Raspberry Pi* són petits ordinadors, que poden incorporar un petit sistema operatiu, mentre que les plaques d'*Arduino* s'utilitzen simplement per executar un sol programa com per exemple una implementació de codi G amb trajectòries d'elements i eixos mòbils.

En el cas concret de les impressores 3D domèstiques (Veure Annex 5), la materialització informàtica de les geometries a imprimir es realitza en dues etapes:

- i) Obtenció del Codi 'G' (format ISO) en un ordinador dedicat
- ii) Execució del fitxer de text corresponent a la llista de Comandes de Codi 'G' en el dispositiu que controla el sistema de producció.

El Codi G generat amb programes lliures i oberts com “*Slic3r*” (Veure Apartat A5.3) té una aparença molt similar a qualsevol altra programació de Control Numèric per Computador i se sol transferir a la impressora 3D (o a qualsevol altre sistema de fabricació concret) a través d'una tarja de memòria tipus 'SD' o bé per connectivitat sense fils.

L'execució del Codi en màquina, en el cas concret de les impressores BCN3D+, es realitza amb una personalització del programa “*Marlin*”, adaptat per incloure totes les funcionalitats de la màquina en cada moment (Veure Figura A2.3-5).

En aquest context, el desenvolupament dels algoritmes i la plataforma d'experimentació “Espai d'Estats” han estat concebuts amb l'ambició que se'n pugui realitzar una versió executable en màquina que sigui pujada a alguns repositoris virtuals i que sigui el conjunt de la Comunitat qui la faci evolucionar i qui l'adapti a cada cas concret.

En el cas *Arduino* per a la execució de comandes de Codi 'G' en impressores domèstiques, es fa servir un llenguatge de text molt senzill que es pot adaptar a les característiques concretes de la màquina en que es vulgui utilitzar. En cas que es realitzin aportacions, és important tornar a pujar els arxius a Internet per a que la resta de la Comunitat els pugui utilitzar. Malgrat això, la capacitat de processat de les plaques *Arduino* és reduïda i per tant en el seu funcionament normal només es poden fer càrrec d'un fil de comandes a cada moment.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica



Figura A2.3-5. Detall de dues pantalles del firmware de la impressora BCN3D+ personalitzat per a una configuració d'un sol capçal (Esquerra) o per a dos capçals independents (Dreta).

En el cas *Raspberry Pi*, la capacitat de processat d'aquests dispositius és major i a més admeten la possibilitat de tenir un sistema operatiu dedicat que faciliti la interacció dispositiu-usuari. Sobre aquest substrat, no seria rar pensar en una possible programació dels algorismes per a la Construcció del Models del Món desenvolupats en el marc de la Present Tesi Doctoral.

Curiosament, en el moment de l'edició final de la present Tesi Doctoral, el programari "*Marlin*" ressenyat ha fet pública una nova versió que incorpora una nova aplicació, inclosa en el *firmware*, dedicada a poder realitzar diverses etapes d'Experimentació i així realitzar el calibratge dels eixos de la màquina en base a l'experiència. Una aplicació d'aquest tipus podria contenir els algorismes desenvolupats en el present treball i per tant obre la porta a una nova línia de treball futura com és el desenvolupament de sistemes de vertadera fabricació intel·ligent.

Annex 3. Programació d'eines dedicades a la Fabricació i a la selecció intel·ligent de sistemes de Fabricació

A3.1. Utilització de diferents Plataformes i entorns de disseny

La programació d'eines informàtiques dedicades a la gestió, control i supervisió de sistemes de Fabricació ha estat objecte d'estudi al Centre CIM des de la seva existència. Dins dels paradigmes de Fabricació Integrada per Ordinador (de l'anglès CIM- *Computer Integrated Manufacturing*), s'han materialitzat moltes aplicacions per a gestionar sistemes molt diferents i en particular, també sistemes per a la selecció intel·ligent de processos i sistemes de fabricació.

Donada la gran diversitat de problemes industrials, existeixen multitud d'eines per respondre a cada programació, integració o desenvolupament informàtic que pugui ser requerit. A tall d'exemple, alguns dels programes utilitzats per a la programació de solucions són *Java*, *C+*, *C++*, *C#*, *Vb.Net*, *ASP.Net*, *PHP*, *XML*, *HTML*, *Javascript*, *JQuery*, *Python* o fins i tot *Android*. Amb aquests llenguatges es poden desenvolupar aplicacions industrials en tots els formats, funcionalitzant interessos com la *ubiquïtat*, la *interoperabilitat* i la possibilitat d'accés a informació en *temps real*.

Dins de les eines desenvolupades en matèria de comandament i execució de processos productius, segurament les més vistoses són aquelles que recullen informació de molts punts diferents i que a més d'enregistrar-la en sistemes de suport a la decisió també la mostren de manera gràfica i intuïtiva de tal forma que permeti revisar l'estat del procés amb un sol cop d'ull (Veure Figura A3.1-1).



Figura A3.1-1. Esquerra: Captura de pantalla de l'aplicació OpenMES de ENCO (BlauFactory) amb indicadors d'eficiència per a tablettes. Dreta: Captura de pantalla del gestor d'Ordres de Fabricació de la mateixa aplicació, que s'utilitza a la Fundació CIM per al control de la producció en temps real. Font: Fundació CIM.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

El desenvolupament d'eines d'aquest tipus és encara avui dia objecte de disseminació donat que l'adopció d'aquest tipus de sistemes industrials al nostre país encara és manifestament millorable en la majoria d'empreses del teixit productiu bàsic constituït per PIMES. Com a exemple de l'esforç posat en la disseminació i intent d'abast, es pot citar el "1r Fòrum LEAN+MES" realitzat en doble edició a Madrid i Barcelona i que va comptar amb gran acollida i un gran nombre d'assistents (Veure Figura A3.1-2).



Figura A3.1-2. Jornada de presentació de casos d'èxit industrials dedicada als sistemes MES (*Manufacturing Execution Systems*) i Fabricació LEAN realitzada a la Fundació CIM el 31/10/2013 . Font: Fundació CIM.

Per a la programació en C+ de la interfície "Espai d'Estats", en el present treball es va decidir utilitzar la plataforma *Microsoft® Visual Studio®*, la qual, tot i ser una aplicació propietària, aporta una sèrie de característiques molt interessants com ara: un alt grau de maduresa a nivell tècnic, la seva compatibilitat amb molts altres programes d'ús habitual i la seva àmplia utilització a nivell global; les quals la converteixen en una plataforma de disseny molt adequada per al desenvolupament d'aplicacions experimentals com la que és objecte del present treball.

D'altra banda, també ofereix eines per a la depuració del codi i per a la manipulació de Bases de Dades (per exemple amb *Microsoft® SQL Server®* o *Microsoft® Access®*), podent utilitzar assistents que faciliten les tasques de programació. També es poden trobar a l'abast molts documents i articles rellevants publicats per programadors experts i la pròpia *Microsoft®* ofereix ajuda en línia per solucionar possibles problemes que poguessin ocórrer (sobretot als programadors menys avesats).

A3.2. Funcionalitats, premisses de disseny

Les funcionalitats que cal exigir a una plataforma d'experimentació com la que és objecte del present treball són:

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

- **Permetre una alta capacitat de parametrització:** L'usuari ha de poder canviar les condicions dels experiments de manera senzilla (en el cas presentat: estats en el món, vector de consignes d'actuació, obstacles en el món, funcions de càlcul de costos...) de manera que puguin realitzar-se experiments en totes les condicions que vulgui definir l'usuari.
- **Aconseguir emmagatzemar gran quantitat d'informació tot mantenint un fàcil accés:** El sistema ha de ser capaç de guardar configuracions, estratègies i llistats d'ordres, de manera que l'usuari pugui seleccionar-les amb rapidesa i no haver de perdre temps cada cop que s'hagi de definir una nova experimentació.
- **Posseir funcionalitats consistents de representació:** El sistema ha de ser capaç de mostrar per pantalla quines són les característiques de partida (definició inicial del món) i què és el que està succeint en tot moment (evolució a través dels diferents estats). Aquesta representació ha de ser necessàriament numèrica i en la mesura del possible també gràfica.
- **Possibilitar l'exportació de resultats:** El sistema ha de facilitar la sortida de les dades en format de full de càlcul o de text pla per al cas que l'usuari vulgui fer-ne un tractament posterior en altres plataformes. Aquesta funcionalitat és molt interessant per al pas a altres sistemes de fabricació per ordinador (CAD-CAM), lliures o propietaris, que s'utilitzin, per exemple, per al comandament de màquines-eina.
- **Tenir una interfície clara, intuïtiva i amigable:** En tractar-se d'una aplicació experimental, l'estètica no és un paràmetre de disseny principal. Malgrat això, sí que és necessari poder treballar en un entorn clar on l'abstracció no desvirtui els conceptes dels algorismes.
- **Disposar de l'estructura bàsica per a permetre treballs posteriors:** El codi ha d'estar degudament documentat i els mètodes d'experimentació prou acurats per assegurar que en cas necessari puguin fer-se manteniments i incorporar noves funcions tant al motor principal com a la interfície.

Amb aquestes funcionalitats requerides per al desenvolupament d'eines de selecció intel·ligent de sistemes de fabricació, en el curs de desenvolupament de la plataforma d'experimentació materialitzada en el present treball, s'han tingut en compte les premisses de disseny següents:

- **Autonomia d'ús:** L'ús de l'aplicació "Espai d'Estats" no ha de requerir la instal·lació de cap programa (es pot executar per sí mateix) i només necessita la instal·lació del propi *Microsoft® Visual Studio®* si es vol editar el codi font. A banda d'aquesta consideració, per tal d'utilitzar-lo no cal tenir cap altre programa instal·lat (per exemple, les gràfiques, informes comparatius i llistats s'han de generar i poder consultar dins la mateixa aplicació).
- **Codi obert:** L'aplicació ha de ser oberta i el codi ha d'estar documentat adequadament per a que contribuïdors posteriors puguin editar-lo i fer-lo evolucionar.
- **Baixos requeriments de sistema:** El seu ús s'ha de poder dur a terme en qualsevol equip, i per tant, en la mesura del possible, els requeriments del sistema han de ser mínims.
- **Possibilitat d'idioma múltiple:** Si es realitza des d'un principi, no és difícil organitzar la informació de manera que els menús puguin aparèixer en diferents idiomes. Donada la vocació de treball col·laboratiu de la pròpia aplicació el programa es presenta en cinc idiomes principals i es deixa oberta la possibilitat d'afegir-ne més fàcilment.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

A3.3. Confecció de la Base de Dades (Base de Coneixement)

Un aspecte molt important, que s'ha tractat de manera especial en la majoria de casos de programació d'aplicacions informàtiques basades en sistemes intel·ligents per a la presa de decisions en matèria de processos productius, és la confecció de la Base de Dades (o Base de Coneixement) que ha de contenir la informació que necessitarà el sistema per funcionar. En moltes aplicacions desenvolupades, els informàtics solen dir que “*primer es munta la Base de Dades i després es materialitza l'aplicació*”; entenent que l'ordenació de la informació és la clau per a una manipulació adequada feta per un programa.

Una Base de Dades és un objecte *concebut i dissenyat per emmagatzemar informació amb una estructura complexa*^[86]. En essència, es podria considerar una Base de Dades un arxiu qualsevol o el contingut global del disc dur de l'ordinador; però el que les fa úniques és el fet que les Bases de Dades estan dissenyades per fer més fàcil la recuperació i edició de les dades que contenen. D'aquesta manera, la finalitat d'una Base de Dades no acaba en el simple fet d'emmagatzemar informació sinó que és necessari que l'estructura de la mateixa possibiliti i faciliti consultar i recuperar dades ràpidament.

En aplicacions com la desenvolupada en el marc del present treball (“Espai d'Estats”), la gestió de la informació i la seva introducció i edició és un cas interessant, doncs en realitat el programa comença a realitzar operacions tenint informació quasi nul·la del món. En alguns dels algorismes presentats, el sistema comença només coneixent quin és l'estat inicial $\{E_0\}$, quines consignes es poden donar als accionaments del sistema $\{\alpha\}$, i quines senyals de sensors es poden captar en tot moment $\{S\}$; però ho desconeix tot sobre els altres possibles estats, les conseqüències de cada acció $\{\alpha\}$, etc. Tota la informació que el sistema vagi aprenent haurà de ser codificada i emmagatzemada degudament en el que es considera com a “*Base de Coneixement*” del Sistema.

Les Bases de Bades convencionals es gestionen a través de programes anomenats “Sistemes de Gestió de Bases de Bades” (en anglès, DBMS -*Database Management Systems*). Aquests gestors de Bases de Dades són en realitat les aplicacions més complexes que existeixen, ja que oculten al desenvolupador de programes de gran part de la complexitat de la pròpia Base de Dades. Alguns exemples ja comentats són Microsoft® Access®, SQL Server® o Oracle®. El llenguatge ‘SQL’ (de l'anglès, *Structured Query Language*) és un llenguatge estàndard universal que utilitzen tots els programes gestors de Bases de Dades. Es basa en sentències concretes de selecció, inserció, actualització o eliminació de dades que s'envien al programa i aquest mateix realitza la recerca concreta, sense que sigui necessari entrar en detalls de com ha de fer-ho.

A nivell pràctic, la construcció de Bases de Dades –o d'estructures de Bases de Coneixement– es realitza emmagatzemant la informació en taules de vectors, o fins i tot en taules de taules (anomenades *Tuples*, com $[\psi]$ en l'exemple de l'“Espai d'Estats”) on tots els elements són de la mateixa classe o categoria, de manera que queden endreçats per files de la taula d'acord amb les seves propietats.

Un cas particular de les Bases de Dades que és rellevant per a programes com “Espai d'Estats” són les Bases de Dades *relacionals*. Aquest tipus de Bases de Dades es caracteritzen per les relacions entre les dades que contenen. Els fonaments teòrics de les Bases de Dades Relacionals són ja madurs, (de fet van ser formalitzats per l'enginyer britànic E.F. Codd l'any 1969 quan treballava a IBM a partir de conceptes matemàtics de teoria de conjunts i lògica de predicats); i en els darrers anys han anat desplegant-se amb l'eclosió de les aplicacions

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

informàtiques complexes. Si es busca un aspecte concret d'una dada (per exemple informació d'un estat particular del món; com quan s'estan obtenint camins practicables entre Estats Inicials i Estats Finals), aquesta mateixa dada pot estar relacionada amb altres dades de la taula o d'altres taules. La utilització adequada d'aquest tipus d'informació pot aportar la capacitat de postulació del que en Capítols anteriors s'ha anomenat com a "prejudicis" i permet obtenir molta més informació de la estrictament continguda a la taula a través de la exploració de patrons de causa-efecte.

Per tal que les dades puguin ser accessibles i fàcilment recuperables, i tenint en compte que el programa "Espai d'Estats" té tendència a fer créixer de manera ràpida la informació que ha d'emmagatzemar per la seva naturalesa exploratòria en el que respecta a la creació i ampliació de Models del Món, s'ha intentat (en la mesura del que ha estat possible) mantenir l'estructura de les taules de manera petita i manejable.

En el programa "Espai d'Estats", el disseny de la forma de la "Base de Coneixement" reflecteix en gran mesura com es desenvolupen els algorismes de construcció de models del món i com es realitzen les etapes posteriors d'execució de tasques i d'avaluació de costos mínims. D'aquesta manera, l'estructura de les taules d'informació que conté és la que recull la Figura A3.3-1 a continuació.

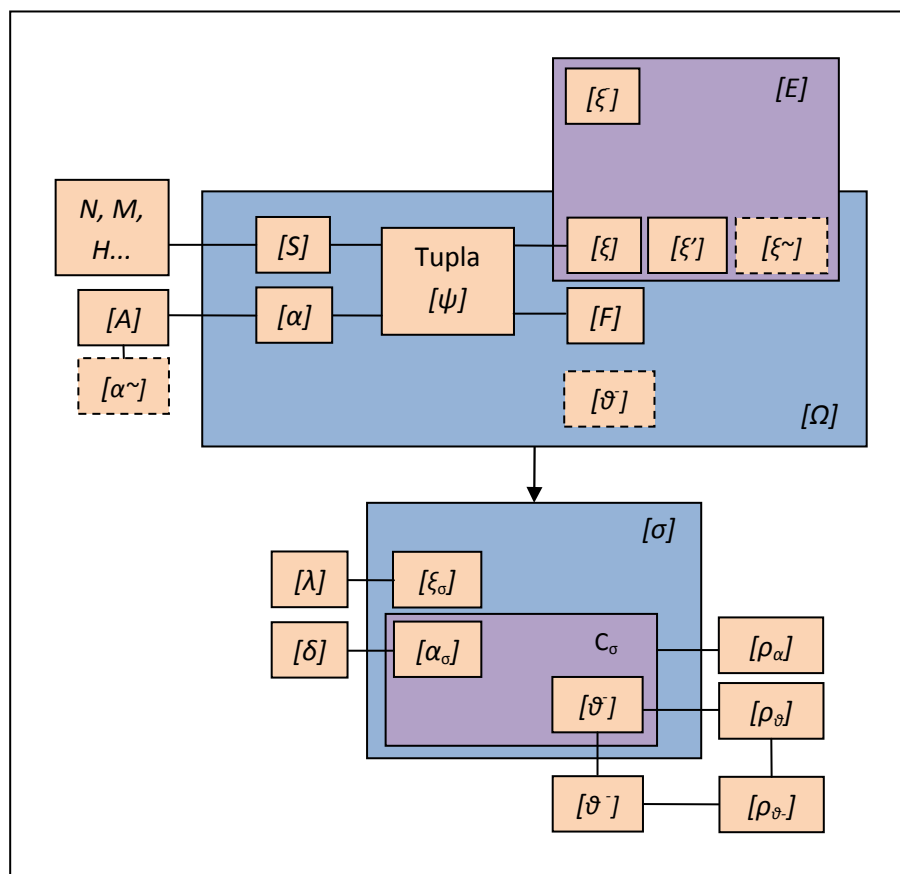


Figura A3.3-1. Estructura de la "Base de Coneixement" del programa "Espai d'Estats".

Altrament, és important destacar que en el sí del programa "Espai d'Estats", la informació de la definició del món que realitza l'usuari està totalment "desacoblada" de la informació que va

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

acumulant el sistema en les seves exploracions. Dit d'altra manera, tot i que l'usuari sàpiga a priori que una determinada consigna d'actuació suposa un moviment sobre l'eix 'x' en direcció positiva (per exemple) i que per tant, l'aplicació d'aquesta consigna a un estat inicial del capçal de la màquina eina l'haurà de desplaçar en aquesta direcció de la retícula 2D si no hi ha obstacles ni fronteres; la màquina a priori no sap que aquesta consigna suposa un moviment sobre l'eix 'x' en direcció positiva i tampoc sap quin és l'estat que es troba en aquesta direcció de la retícula.

Aquest desacoblament de la informació és el fonament del programa i permet fer que aquest pugui implementar sense problemes moviments més complicats a les consignes i correspondències complexes entre estats.

Un altre punt destacable és que en el desenvolupament de l'aplicació d'"Espai d'Estats" s'ha fet un esforç per incorporar tots els aspectes rellevants en les tendències actuals d'utilització de metaheurístiques combinades (o híbrides) descrites a l'apartat 2.4.1. Aquests aspectes, recollits per Gendreau i Potvin^[87] l'any 2005 són:

- **Construcció:** Fase utilitzada per totes les *metaheurístiques* per crear solucions inicials (especialment per a aquells mètodes iteratius).
- **Recombinació:** Generació de solucions noves a partir de solucions anteriors.
- **Millora mitjançant la introducció d'aleatorietat:** Modificació de les solucions per utilització de pertorbacions aleatòries –introducció de noves tasques encomanades que poden donar lloc a nous Models del Món-.
- **Millora per cerca en solucions veïnes:** específicament abordat en l'Etapa d'Execució de Tasques per a explorar possibles arbres de solucions.
- **Actualització de Memòria:** Solapament del coneixement resident en un Model del Món amb el coneixement proporcionat per un nou Model més nou.
- **Actualització de paràmetres:** Ajust del Món per introducció de canvis externs. Possibilitat d'introduir nous obstacles o noves relacions entre estats diferents, així com "objectes ocults" i "accionaments no controlats".

Finalment, el detall de totes les Variables i Constants que governen el programari "Espai d'Estats" es pot consultar a la Taula de la Figura A3.3-2 que es recull en les pàgines a continuació.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Figura A3.3-2. Taula de Variables i Constants que governen el programari "Espai d'Estats".

Núm.	Nom	Entorn de la variable/constant	Tipus	Descripció	Valor
1	bDebug	Variable de depuració	Booleà	Variable del sistema per depurar el codi del programa. Si el seu valor és <i>False</i> , informa dels errors obtinguts.	<i>True/False</i>
2	m	Variable de definició del món	Long	Longitud del món en x.	-
3	n	Variable de definició del món	Long	Longitud del món en y.	-
4	p	Variable de definició del món	Long	Longitud del món en z.	-
5	mmin	Constant de definició del món	Integer	Mínim valor de m. Longitud mínima del món en x.	2
6	mmax	Constant de definició del món	Integer	Màxim valor de m. Longitud màxima del món en x.	10
7	nmin	Constant de definició del món	Integer	Mínim valor de n. Longitud mínima del món en y.	2
8	nmax	Constant de definició del món	Integer	Màxim valor de n. Longitud màxima del món en y.	10
9	pmin	Constant de definició del món	Integer	Mínim valor de p. Longitud mínima del món en z.	0
10	pmax	Constant de definició del món	Integer	Màxim valor de p. Longitud màxima del món en z.	1
11	bBoundary	Variable de definició del món	Booleà	Defineix si el programa considera les fronteres o no.	<i>True/False</i>
12	b3D	Variable de definició del món	Booleà	Determina si es tracta de la resolució d'un problema 2D o 3D.	<i>True/False</i>
13	dimvector	Constant de definició de vectors	Integer	Defineix la longitud dels vectors (3) com vectors cartesianes	

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Núm.	Nom	Entorn de la variable/constant	Tipus	Descripció	Valor
14	vector	Classe vector	Classe	Defineix la classe vector que emmagatzema les alphas. Inclou un mètode constructor per inicialitzar vectors/alphas (u).	-
15	u	Variable de definició de vectors	Long	Emmagatzema les dades per les alphas. Està inclosa dins la classe vector.	Inicialitzat a (0, 0, 0) pel mètode constructor de la classe
16	alpha1	Constant de definició de vectors	vector	Vector (0, 0, 0).	(0, 0, 0)
17	alpha2	Constant de definició de vectors	vector	Vector (1, 0, 0).	(1, 0, 0)
18	alpha3	Constant de definició de vectors	vector	Vector (0, 1, 0).	(0, 1, 0)
19	alpha4	Constant de definició de vectors	vector	Vector (0, 0, 0,1).	(0, 0, 0,1)
20	alpha5	Constant de definició de vectors	vector	Vector (2, 3, 0).	(2, 3, 0)
21	alphaN	Variable de definició de vectors	vector	Col·lecció de vectors/alphas predefinits.	alpha1 – alpha5
22	alpha-Custom	Variable de definició de vectors	vector	Col·lecció variable en longitud de vectors per emmagatzemar una seqüència de vectors definida per l'usuari.	-
23	dimvector-collection	Constant de definició d'estratègies	Integer	Constant	Restringit a 3
24	vector-collection	Classe d'estratègia	Classe	Defineix la classe estratègia que emmagatzema les estratègies. Inclou un mètode constructor per inicialitzar estratègies (ucollection).	-

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Núm.	Nom	Entorn de la variable/constant	Tipus	Descripció	Valor
25	ucollection	Variable de definició d'estratègies	vector-collection	Col·lecció de vectors que configuren una estratègia. Emmagatzema una seqüència de vectors de la classe vector (u).	-
26	nStrategies	Constant de definició d'estratègies	Integer	Nombre d'estratègies predefinides.	-
27	Strategies	Variable de definició d'estratègies	vector-collection	Col·lecció d'estratègies predefinides. Actualment es contemplen 6 estratègies predefinides: col·leccions de vectors/alphas de longitud 3 amb cap vector/alpha repetit.	-
28	selected-Strategy	Variable de definició d'estratègies	vector-collection	Estratègia seleccionada.	-
29	nheads	Variable de definició de capçals	Integer	Nombre de capçals en el món.	-
30	headsmin	Constant de definició de capçals	Integer	Nombre mínim de capçals en el món.	1
31	headsmax	Variable de definició de capçals	Integer	Nombre màxim de capçals en el món.	Restringit a 1
32	nobstacles	Variable de definició d'obstacles	Integer	Nombre d'obstacles en el món.	obstacles-min ≤ nobstacles ≤ obstacles-max
33	obstacles-min	Constant de definició d'obstacles	Integer	Nombre mínim d'obstacles en el món.	0

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Núm.	Nom	Entorn de la variable/constant	Tipus	Descripció	Valor
34	obstacles-max	Constant de definició d'obstacles	Integer	Nombre màxim d'obstacles en el món.	m*n - nheads - nobjectives
35	nobjectives	Variable de definició d'objectius	Integer	Nombre d'objectius en el món.	-
36	objectives-min	Constant de definició d'objectius	Integer	Nombre mínim d'objectius en el món.	0
37	objectives-max	Constant de definició d'objectius	Integer	Nombre màxim d'objectius en el món.	m*n - 1 (exploració lliure) m*n - 2 (exploració per objectius)
38	plong	Estructura de definició de punts	Estructura	Emmagatzema les coordenades X, Y, Z de qualsevol punt. Definició de qualsevol punt a l'espai.	-
39	X	Variable de definició de punts	Long	Coordenada X de qualsevol punt.	-
40	Y	Variable de definició de punts	Long	Coordenada Y de qualsevol punt.	-
41	Z	Variable de definició de punts	Long	Coordenada Z de qualsevol punt.	-
42	st	Estructura de definició d'estat	Estructura	Emmagatzema els estats segons les disposicions de tots el capçals, obstacles i objectius.	-

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Núm.	Nom	Entorn de la variable/constant	Tipus	Descripció	Valor
43	heads	Variable de definició de punts	plong	Col·lecció de capçals dintre del sistema.	-
44	obstacles	Variable de definició de punts	plong	Col·lecció d'obstacles dintre del sistema.	-
45	objectives	Variable de definició de punts	plong	Col·lecció d'objectius dintre del sistema.	-
46	alphaactual	Variable de definició de vectors	vector	Emmagatzema el vector/alpha que s'aplica actualment.	-
47	nalphastate	Variable de definició de vectors	Integer	Comptador de vectors/alphas aplicats fins al moment.	-
48	alphastate	Variable de definició de vectors	vector	Col·lecció de vectors/alphas aplicats fins al moment.	-
49	nalpha-difstate	Variable de definició de vectors		Comptador de vectors/alphas aplicats segons un tipus d'exploració fins al moment.	-
50	alphadif-state	Variable de definició de vectors	vector	Col·lecció de vectors/alphas aplicats segons un tipus d'exploració fins al moment.	-
51	actualstate	Variable de definició d'estat	st	Estat actual del capçal. Inclou l'estat dels obstacles i objectius.	-
52	nstmin	Variable de definició d'estat	Integer	Nombre mínim d'estats que es poden visitar incloent l'estat actual.	1
53	nstmax	Variable de definició d'estat	Integer	Nombre màxim d'estats que es poden visitar incloent l'estat actual.	-
54	nnavstate	Variable de definició d'estat	Integer	Comptador d'estats pels que passa el capçal fins al moment.	-

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Núm.	Nom	Entorn de la variable/constant	Tipus	Descripció	Valor
55	navstate	Variable de definició d'estat	st	Col·lecció d'estats pels que passa el capçal fins al moment. Inclou l'estat dels obstacles i objectius.	-
56	nnavdif- state	Variable de definició d'estat	Integer	Comptador d'estats segons un tipus d'exploració pels que passa el capçal fins al moment.	-
57	navdif- state	Variable de definició d'estat	st	Col·lecció d'estats segons un tipus d'exploració pels que passa el capçal fins al moment. Inclou l'estat dels obstacles i objectius.	-
58	actualstep	Variable de control de simulació	Integer	Pas actual a la simulació del recorregut del capçal.	-
59	totalsteps	Variable de control de simulació	Integer	Passos totals a la simulació del recorregut del capçal. Iteracions realitzades. Té valor nul si la simulació no engega per altres causes o excepcions.	Per defecte 100 Min: itermin Max: itermax
60	iter	Variable de control de simulació	Integer	Comptador per les iteracions.	Inicialitzada a 0
61	itermin	Variable de control de simulació	Integer	Iteracions mínimes permeses.	0
62	itermax	Variable de control de simulació	Integer	Iteracions màximes permeses. Límit de seguretat per iteracions segons el tipus d'exploració i estratègies realitzades.	Restringit a 10.000

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Núm.	Nom	Entorn de la variable/constant	Tipus	Descripció	Valor
63	interface-status	Variable de definició de la interfície	Integer	Codificació numèrica (0-3) que defineix l'estat de la interfície segons la situació del programa.	Inicialitzada a 0
64	UIStatus	Variable de definició de la interfície	Enum	Enumeració que defineix els valors numèrics per a l'estat de la interfície. Conté 4 estats diferents: <ul style="list-style-type: none"> • STATUS_INITIAL = 0 • STATUS_WAITING = 1 • STATUS_EXECUTING = 2 • STATUS_SAVING = 3 	-
65	lang	Variable de definició de la interfície	String	Valor de la llengua seleccionada.	-
66	EXP_INITIAL	Variable de tipus d'exploració	String	Valor inicial del tipus d'exploració. Varia amb la llengua seleccionada.	-
67	EXP_FREE	Variable de tipus d'exploració	String	Valor per a la exploració lliure. Varia amb la llengua seleccionada.	-
68	EXP_OBJECTIVES	Variable de tipus d'exploració	String	Valor per a la exploració per objectius. Varia amb la llengua seleccionada.	-

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Núm.	Nom	Entorn de la variable/constant	Tipus	Descripció	Valor
69	EXP_ USER	Variable de tipus d'exploració	String	Valor per a la exploració per usuari. Varia amb la llengua seleccionada.	-
70	helpfolder	Variable del formulari d'ajuda	String	Nom de la carpeta on es troben els documents d'ajuda al usuari.	"helpfiles"
71	helppath	Variable del formulari d'ajuda	String	Ruta de la carpeta on es troben els documents d'ajuda al usuari. Inclou el nom d'aquesta carpeta.	Application. StartupPath.ToString & "\" & helpfolder & "\"
72	helpext	Variable del formulari d'ajuda	String	Extensió dels documents d'ajuda al usuari.	".htm"
73	h	Variable gràfica	Integer	Marges horitzontals de la representació del món.	2
74	v	Variable gràfica	Integer	Marges verticals de la representació del món.	2
75	hcmargin	Variable gràfica	Integer	Marges horitzontals de la representació dels objectes al món.	10
76	vcmargin	Variable gràfica	Integer	Marges verticals de la representació dels objectes al món.	10
77	gridwidth	Variable gràfica	Integer	Gruix de la reixeta.	2
78	i	Variable comptadora	Integer	Comptador d'elements emprat freqüentment.	-
79	j	Variable comptadora	Integer	Comptador d'elements emprat freqüentment.	-
80	k	Variable comptadora	Integer	Comptador d'elements emprat freqüentment.	-

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Núm.	Nom	Entorn de la variable/constant	Tipus	Descripció	Valor
81	auxstr	Variable auxiliar	String	Cadena caràcters emprada freqüentment.	-

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

A3.4. Aplicacions i usabilitat: El factor humà

Quan es desenvolupa una aplicació, un dels criteris principals per a assegurar la seva funcionalitat ha de ser el de mantenir un disseny que, en la mesura del possible, redueixi tots els errors que podrien arribar a induir un mal funcionament o a resultats inesperats.

Arribar a reduir al mínim els errors causats per la naturalesa del factor humà no és una tasca senzilla per al programador en aplicacions complexes i/o que continguin moltes línies de codi, ja que aquest ha de contemplar totes les possibilitats que pot arribar a generar el comportament de l'usuari, que es pot traduir en milions de seqüències i combinacions de comandes diferents.

Aquest motiu sintetitza clarament un dels contrasentits actuals de la programació. Un programa que deixi llibertat d'acció pot ser beneficiós per a l'usuari perquè pot permetre-li realitzar més operacions i simular condicions més acurades, però pot resultar una programació poc robusta. En l'altre extrem, una programació massa extensiva, si bé redueix errors, limita la maniobrabilitat de l'usuari tot minvant les opcions d'ús del programa i sovint el fa complicat per als no experts. Així doncs, la millor solució sol trobar-se en un punt intermedi.

A l'aplicació "Espai d'Estats" desenvolupada en el marc del present treball, les qüestions d'usabilitat i errors apareixen des de dues vessants diferents. D'una banda, un usuari humà fa ús del programa. Això vol dir que el programa ha d'estar preparat per aconseguir combinar la usabilitat amb la robustesa i per tant permetre simular molts supòsits alhora que se'n treuen resultats fiables i lliures d'errors de processat. D'altra banda, el propi sistema du a terme labors d'exploració per construir models del món i més endavant executar tasques que li puguin ser encomanades. D'aquesta manera, el *programa* es converteix en *l'usuari* (tal com apunta el paradigma de fabricació intel·ligent) i per tant cal també assegurar que en aquesta derivada d'ús no hi puguin aparèixer efectes inesperats o adversos.

En el desenvolupament del programa "Espai d'Estats", la selecció, format i ubicació dels components de l'aplicatiu s'ha realitzat d'acord amb una sèrie de cinc aspectes concrets utilitzats en els estàndards d'accessibilitat web [88] que es detallen a continuació.

i) Interfície intuïtiva i clara

Donada la profunditat de les idees que hi ha al darrere de les proves de concepte en les diferents etapes de realització dels algoritmes per a la construcció de models del món, és important dotar al sistema d'una interfície intuïtiva i que ofereixi a l'usuari la possibilitat d'utilitzar el programa des del primer moment i d'anar incorporant funcions més complexes de manera seqüencial. Per aquest motiu, l'aplicació "Espai d'Estats" disposa a la pantalla les diferents finestres en l'ordre lògic d'utilització de la informació que contenen.

La claredat d'una interfície també és conseqüència de l'ús de determinades pautes de disseny que es puguin trobar en programes comunament utilitzats (el qual també serveix per evitar errors que puguin haver estat detectats i solucionats en experiències anteriors). L'aplicació "Espai d'Estats" s'ha confeccionat de manera similar a nivell d'interfície que d'altres programes

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

similars, de manera que els usuaris que hi estiguin familiaritzats puguin trobar més facilitat en el seu maneig.

ii) Traçabilitat i Possibilitat de Rectificació

Per tal que l'usuari sàpiga en tot moment quines característiques té el món i quin tipus d'exploració i tasques s'està realitzant, s'ha implementat a les corresponents finestres una sèrie d'elements basats en els mòduls "*ListBox*" (llistes desplegable dins de les quals es troben totes les opcions disposades per a l'usuari en aquell moment), i grups de "*Radiobutton*" (elements excloents els uns als altres amb la possibilitat d'escollir únicament una opció de la qual marquen). D'aquesta manera, amb un sol cop d'ull es pot conèixer tota la informació de configuració principal, alhora que també es limiten les possibilitats que l'usuari introdueixi configuracions incoherents en el programa

Donat que l'objectiu del programa és la realització d'experiments, és important donar l'oportunitat de poder revertir les accions realitzades i poder veure com va evolucionant el món amb cada acció de l'usuari. Per això, a la finestra d'execució de tasques, s'ha implementat uns botons que permeten anar endavant i enrere a la llista d'estats, de manera que sigui quina sigui el tipus d'exploració empresa, l'usuari pugui realitzar una revisió pas a pas de tots els estats assolits.

iii) Comportament en cas d'error (excepcions)

Una aplicació robusta ha de preveure totes les possibilitats d'operació que pugui realitzar l'usuari per poder donar-hi una resposta útil en cada moment. L'"Espai d'Estats" fa èmfasi en advertir a l'usuari quan es deixen camps en blanc o s'introdueixen caràcters invàlids o nombres per sobre del límit màxim o per sota del límit mínim. En aquests casos, l'advertència es realitza mitjançant quadres de diàleg (tipus "*MsgBox*" o qualsevol altre element anàleg) que informen a l'usuari de l'error comès i permet tornar a introduir un valor vàlid.

Pel que fa als errors d'operació esdevinguts durant l'execució automàtica de seqüències del programa, el programa mostra per pantalla un missatge d'alerta i guarda tota la informació (experimentació i estats) que ha realitzat abans de la fallida. En cas de programadors experts i amb ordinadors on hi hagi instal·lats complements de programari, la funció sobre tractament d'errors ("*TreatError*") implementada en el propi codi permet al programador distingir entre estats de depuració de codi.

iv) Aplicació combinada d'Interfícies Gràfica i de Menú

Dins una aplicació es poden diferenciar tres tipus d'interfície d'usuari: *Gràfica*, de *Menú* i de *Comandes*, que es corresponen amb tres possibles modes de comunicació entre l'usuari i l'ordinador.

La interfície Gràfica (*GUI*, de anglès *Graphic User Interface*) és aquella que es basa en icones i elements purament gràfics per mantenir la comunicació amb l'usuari, tant en donar ordres com en oferir una resposta. Al programa d'Espai d'Estats aquest tipus d'interfície és la més explotada, doncs permet tenir totes les dades actives a la vista i proporciona un control de l'aplicació molt més intuïtiu.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

La interfície de Menú (*MUI*, de l'anglès *Menu User Interface*) és aquella que es basa en elements de menú, llistes i desplegable que porten escrit la funció o opció corresponent. A l'espai d'Estats la *MUI* es troba en una barra a la part superior de la pantalla i està dotada d'una certa redundància amb la *GUI*.

Finalment, no s'ha cregut necessari implementar cap interfície mitjançant comandaments (*CUI*, en anglès *Command User Interface*), més enllà de les tecles d'accés ràpid convencionals donat que les funcions i opcions del programa es realitzen sempre de forma seqüencial.

v) Unicitat i coherència d'estil i formats

L'"Espai d'Estats" intenta mantenir un estil homogeni i coherent en tot moment per tal de millorar l'experiència de l'usuari. Es consideren importants les fonts, les dimensions de lletra, els colors, els efectes i els dissenys, que s'apliquen en coherència amb els botons, quadres desplegable, llistes i altres elements comuns.

De la mateixa manera es fa un esforç important en mantenir una mateixa iconografia (senzilla però que no doni lloc a equívocs) en tot moment. En aquesta línia, també s'ha fet el possible per fer coincidir la selecció d'elements i opcions de programa a través dels diferents menús disponibles.

A3.5. Exemples d'eines dedicades a la selecció intel·ligent de sistemes de Fabricació

Com ja s'ha comentat en apartats anteriors, a la Fundació Privada Centre CIM de la Universitat Politècnica de Catalunya existeixen diversos antecedents de programació d'eines dedicades a la selecció intel·ligent de sistemes de fabricació. Dos d'aquests antecedents, amb els quals es va tenir la oportunitat de coincidir en el treball i inclús de realitzar comunicacions conjuntes en revistes i congressos són els que es presenten en els subapartats a continuació.

A3.5.1. RMADS: El programari de MAQMA

En el sentit més ampli, l'important nombre de tecnologies de fabricació que es disposen actualment a l'abast tant d'enginyers com de dissenyadors industrials fa aconsellable la utilització de sistemes experts basats en ordinador com a sistemes d'anàlisi i selecció dels processos més adequats per a la obtenció de productes específics.

Si bé en alguns casos la selecció d'alternatives de fabricació es pot simplificar quan només es té una disponibilitat física real limitada de tecnologies o processos, el procés de selecció pot arribar a ser força complex quan el que interessa analitzar són noves tecnologies o processos per als quals el coneixement pràctic necessari no es troba fàcilment a l'abast. En el cas específic dels equipaments per a obtenció de productes mitjançant Fabricació Additiva per a producte final, l'informe Wohlers de 2006 [89] ja reportava més de 25 fabricants que comercialitzaven uns 60 equips diferents. Aquest nombre, que va creixent exponencialment amb els anys, es preveu que encara tinguin un gran increment i recorregut donada la relativa

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

baixa penetració que encara tenen aquestes tecnologies a nivell industrial si bé l'adopció per part d'altres sectors està essent més ràpida.

El programari desenvolupat en el marc del projecte MAQMA, anomenat "RMADS" o "Rapid Manufacturing Advice System" s'encarrega de modelar un sistema concurrent per a l'avaluació de processos de *Rapid Manufacturing* (Fabricació Directa) recolzat en tècniques d'intel·ligència artificial com xarxes neuronals, lògica difusa i sistemes experts. L'aplicació pilot desenvolupada il·lustra el funcionament d'aquestes eines en un sistema integrat d'ajuda a la decisió per seleccionar, per a un producte en concret, la tecnologia de Fabricació Additiva disponible més adequada entre les possibilitats següents: Estereolitografia (SLA), Sinteritzat Selectiu per Làser (SLS), Deposició de Fil Fos (FDM), Sinteritzat Làser Metàl·lic (DLMS) i altres derivades com ara la Fusió Selectiva per Làser (SLM) o la Fusió per Feix d'electrons (EBM).

La selecció del procés més adequat es pot realitzar en funció de paràmetres com el volum de construcció disponible, la precisió de l'equipament (gruix de capa), el tipus de material, la velocitat de deposició i altres paràmetres complementaris de l'equipament. Amb les dades subministrades per l'usuari, el sistema realitza una anàlisi completa sobre la viabilitat tècnica, econòmica i funcional dels diferents processos disponibles de Fabricació Directa.

El sistema és una solució integrada d'informació que es compon dels tres mòduls de treball següents:

- *Mòdul de requeriments funcionals*: Sistema expert recolzat en lògica difusa per a gestionar tant informació qualitativa com quantitativa per a la selecció i exclusió de processos (Veure Figura A3.5-1).
- *Mòdul d'anàlisi de costos*: Basat en Xarxes neuronals artificials i models paramètrics per a la estimació de costos mitjançant informació abreviada del producte a fabricar.
- *Mòdul de selecció de materials*: Materialitzat sobre Bases de Dades relacionals i un sistema expert que gestiona criteris de selecció de material.

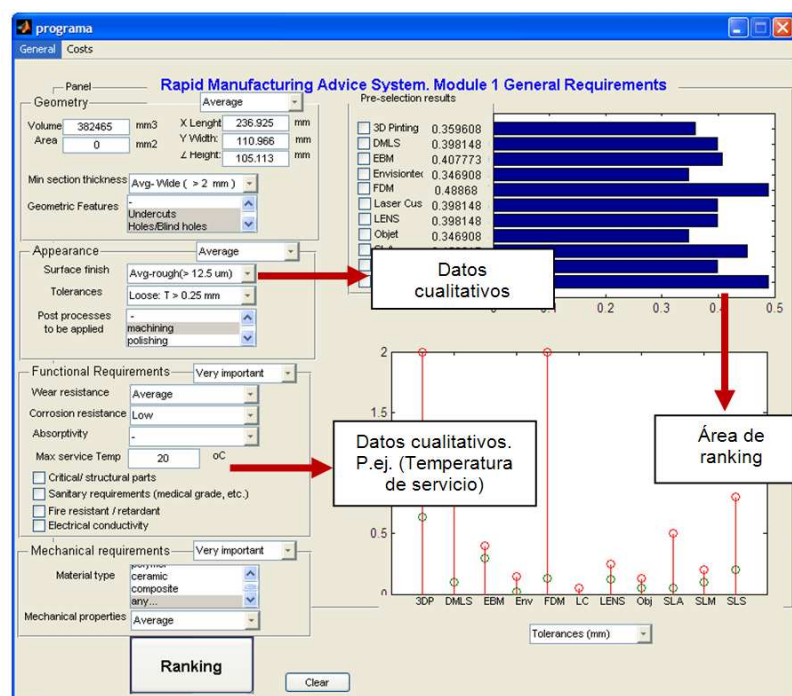


Figura A3.5-1. Aparència del Mòdul de Requeriments Funcionals de "RMADS". Font: [90]

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Comparada amb la implementació duta a terme en el present treball, el cas de *RMADS* correspon a una aplicació que parteix d'un Base de Dades de mitjana envergadura mentre que a *Espai d'Estats* a l'inici de l'experimentació la informació del Món és molt reduïda i la Base de Dades es va construir a mesura que el sistema aprèn. D'altra banda, a *RMADS* es realitza un tractament amb tècniques d'IA tot i que no està dissenyat per a l'aprenentatge en sí, sinó que es tracta d'un procediment calibrat per a proposar la millor tècnica de Fabricació Additiva per a una aplicació específica.

L'aplicació "*RMADS*" de "*MAQMA*" va ser presentada per l'alumne de la Universitat Politècnica de Catalunya Javier Munguía Valenzuela el Desembre de 2009 durant la lectura de la seva Tesi Doctoral i li va valdre una qualificació de Matrícula d'Honor amb menció *Cum Laude*.

A3.5.2. *Selectool*: Selecció d'eines de tall

Actualment es pot trobar una gran quantitat d'oferta en el mercat de les eines de tall, que es canalitza a través de catàlegs molt extensos i per a cadascun dels fabricants i proveïdors. Cercar l'eina de tall idònia per a una determinada aplicació segons el criteri particular de l'operari és complicat i costós en temps i sovint acaba amb la intervenció d'un assessor especialitzat en les condicions particulars de la geometria a produir i del material utilitzat. En afegit, si l'elecció de la eina no és bona, es pot incórrer també en quantiosos perjudicis econòmics i en no assoliment de compromisos de fabricació.

El programa "*Selectool*" és una eina informàtica desenvolupada durant els anys 2010 i 2011 a la Universitat Politècnica de Catalunya dedicada a assistir a l'usuari a realitzar recerques d'eines de tall de múltiples fabricants segons l'adequació dels seus paràmetres al criteri propi de l'usuari. La cerca i selecció d'eines, que es pot dur de manera fàcil i ràpida, permet generar comparacions gràfiques entre els resultats i també produeix informes en format text per ajudar a l'usuari en la seva decisió final.

L'abast de la informació continguda inicialment a *Selectool* són les d'eines de tall (plaquetes i eines senceres) per a la mecanització (Fresatge lateral, Ranurat i Fresatge 3D) de materials per a quatre sectors principals: Automoció, Aeronàutica, Espai i Biomedicina. Els materials contemplats són fonamentalment acers inoxidable austenítics i titani i els seus aliatges. Els criteris de selecció són modulables en funció de la política de la pròpia empresa (criteris de màxima vida útil d'eina o de màxima productivitat) i contenen, entre d'altres, informacions de caire geomètric i econòmic de cadascuna de les eines.

Els objectius aconseguits per l'eina informàtica "*Selectool*" són ^[91]:

- Allotjar una Base de Dades amb un gran nombre d'eines i fabricants entre les quals poder escollir o demanar informació
- Tenir a la disposició de l'usuari el major nombre de materials, operacions i tipus d'eina possibles, oferint la màxima informació a l'usuari sobre una eina concreta
- Oferir diverses vies i múltiples opcions de cerca amb accés ràpid i fàcil, donant a triar a l'usuari el major nombre de paràmetres de cerca
- Mostrar una interfície amigable i intuïtiva, clara i accessible

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

- Oferir ajuda i assistència d'àmbit general a l'usuari, especialment en les tasques de recerca i de generació de gràfics
- Disposar la seva estructura bàsica per a futures millores, ampliacions, noves funcions i per al seu fàcil manteniment a nivell de contingut i interfície

L'eina "Selectool", desenvolupada en *Microsoft® Visual Studio® 2008* es fonamenta en una Base de Dades preparada en *Microsoft® Access® 2007* en format és *.mdb* sobre la qual es realitzen consultes SQL. L'estructura d'aquesta Base de Dades està composta per una sèrie de taules amb els camps necessaris corresponents als paràmetres anteriorment presentats. Les taules principals són (i) Taula general amb informació comuna, (ii) Taula de geometria per a eines senceres, (iii) Taula de geometria per a plaquetes indexades i (iv) Taula de Materials-Operacions amb la informació necessària relativa a les operacions de tall contemplades (Veure Figura A3.5-2).

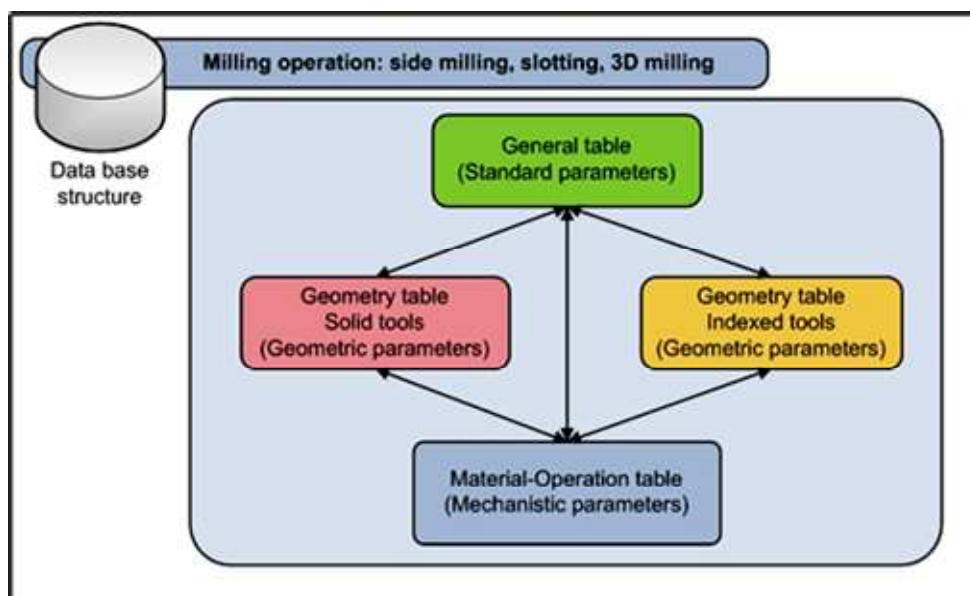


Figura A3.5-2. Estructura de la Base de Dades del programa "Selectool". Font: [91]

Comparada amb la implementació duta a terme en el present treball, *Selectool* es tracta d'una aplicació que incorpora una Base de Dades de gran envergadura i que pot ser ampliable de manera senzilla amb informació de nous productes a mesura que van apareixent al mercat. A diferència d'*Espai d'Estats*, però, la introducció d'informació no és autònoma per part del sistema, si bé podria desenvolupar-se un mòdul que cerqués aquesta informació automàticament a la xarxa i la carregués per si mateixa. De la mateixa manera *Selectool* no incorpora mòduls amb tècniques d'IA ja que no està dissenyat per a l'aprenentatge en sí, però podrien introduir-se fàcilment amb la citada connexió a xarxa.

L'aplicació *Selectool v1.0* va ser presentada per l'alumne de la Universitat Politècnica de Catalunya Juan Arjona Montes el Març de 2012 durant la defensa del seu Projecte Final de Carrera d'Enginyer Industrial (Pla 94) i li va valdre una qualificació de Matrícula d'Honor. Posteriorment, pel mateix treball també rebria el premi a Millor Projecte Final de Carrera de l'àmbit de Mecànica a la ETSEIB i un dels tres Premis *ex-aequo* al Millor Projecte Final d'Estudis de la *Sociedad de Ingeniería de Fabricación* (SIF).

Annex 4. Fabricació en massa de béns personalitzats. Fabricació Poc Convencional

A4.1. Fabricació del Segle XXI: Principals reptes i oportunitats

En un món on el mercat és global, l'oferta també és global i els clients s'han acostumat a tenir sempre tot allò que desitgen a preus assequibles. Si més no, els clients pateixen actualment una sobresaturació dels mercats on, com a mínim, poden escollir quin producte comprar entre un rang molt ampli.

Amb aquest context, les empreses no en tenen prou amb disposar de coneixements del producte i una llarga trajectòria en el mercat. Tot el que és bo es pot imitar o directament copiar i tot el que es pot reproduir, es pot arribar a fabricar més barat en algun lloc del món; sigui al costat de l'original o a milers de quilòmetres de distància. Per tant, a priori, el factor del cost ha deixat de ser un factor competitiu primari i ha passat a ser una condició indispensable per a ser considerat com a una alternativa possible per part dels consumidors.

D'aquesta manera, diversos autors (E. Barba [⁹²], F. Fenollosa [⁹³]) coincideixen en que la supervivència de les empreses s'ha d'aconseguir mitjançant:

- i) La innovació tecnològica constant, afegint valor als productes de manera que el consumidor percebi una diferenciació constant de la competència
- ii) La sortida ràpida al mercat, mantenint un temps de sortida i una penetració al mercat més ràpida que la competència

Per tant, de forma molt resumida, la capacitat efectiva d'innovació de producte en una empresa, radica en gran mesura en la capacitat de fabricació ràpida de producte que pugui tenir: no només cal tenir un bon producte, sinó que cal assegurar que aquest producte arribarà ràpidament al mercat per poder-ne treure benefici abans que la competència pugui provar-lo i copiar-lo.

En els casos de productes de consum en massa (com ara la informàtica de consum), aquest efecte és conegut i comporta inversions molt grans. A tall d'exemple es pot citar la companyia Nord-americana *Apple*, que realitza els seus llançaments de producte a nivell global i per tant necessita fabricar massivament a preus molt baixos i en intervals de temps molt curts. La política d'aquesta empresa –que s'estudia com un cas d'èxit de disseny de producte i penetració al mercat- realitza amb cada nou llançament de producte la posada en marxa d'uns mitjans de producció massius a la Xina, mobilitzant centenars de milers de treballadors en les factories de *Foxconn* dels parcs empresarials de *Shenzhen Longhua*.

Per aconseguir fabricar de manera ràpida, les eines actuals permeten partir de dissenys 3D assistits per ordinador i processar-los informàticament per obtenir peces d'una manera directa. Cada cop en més casos, les peces obtingudes d'aquesta manera són peces finals. En d'altres, les peces obtingudes són prototips que serviran per apropar la data de llançament del producte a la data de la concepció de la idea inicial.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

De forma general, aquestes eines que serveixen per accelerar la maduració del producte per arribar ràpidament a la seva fase de llançament se centren en atacar les etapes de *prototipat virtual* i *prototipat físic* i intenten aconseguir que les peces fabricades en la primera emissió siguin ja peces finals (d'aquí el nom de fabricació directa). Per tal d'aconseguir-ho, aquestes tecnologies, també anomenades "Tecnologies de Compressió del Temps de Desenvolupament de Producte" o TCTs (de l'anglès "*Time Compression Technologies*"), es focalitzen en reduir en gran mesura la necessitat de treballs manuals de modelista per materialitzar els conceptes continguts en els nous productes, tot substituint-ho per treballs virtuals o automàtics.

De fet, molts dels departaments de les empreses implicats en el llançament de productes poden beneficiar-se de les tecnologies anomenades de "*prototipatge ràpid*", ja que donen suport a moltes vessants de les etapes de disseny, com ara el Disseny Conceptual, el Disseny d'Estil, el Disseny Industrial (o funcional), el Disseny de Línies productives o fins i tot als Assajos de normatives i regulacions. D'altra banda, la seva aplicació no és sectorial sinó transversal, doncs se'n troben exemples en molts sectors industrials: automoció, productes de consum, embalatge, arquitectura, món mèdic, món artístic, etc.

És clar que l'àmbit tecnològic de les TCT's és molt ampli. Conté des de les tecnologies electròniques i informàtiques de tractament geomètric (escanejat de sòlids, disseny per ordinador, processat de superfícies), fins a tecnologies de materialització de peces; per exemple, mitjançant la Fabricació Additiva (que n'és la família de tecnologies més visible del conjunt englobat dins les TCT's) fins a replicació de sèries curtes mitjançant tecnologies ràpides d'emmotllament com ara els motlles de silicona.

El conjunt de tecnologies contingudes dins les TCT's es troba força consolidat actualment. Malgrat això, totes aquestes tecnologies continuen però una evolució continua necessària per intentar fer front a diferents reptes com els que es recullen a continuació:

- **Materials i Propietats:** Les tecnologies de prototipat ràpid utilitzen materials que funcionen bé amb els processos als que són sotmesos i que imiten les propietats dels plàstics tècnics que es fan servir en aplicacions finals reals. Per exemple, en el cas de l'Automoció es fan servir tecnologies de Sinteritzat tipus SLS (Sinteritzat Selectiu per Làser) que utilitzen majoritàriament pols de Poliamida. El problema és que en molts casos els plàstics utilitzats com a materials finals en les aplicacions reals –que normalment es processen mitjançant injecció– no són els mateixos materials que els utilitzats en les tecnologies de prototipat ràpid. Per tant, encara que es puguin obtenir les mateixes geometries que les demanades en la fabricació final, no es pot parlar plenament de fabricació directa amb *materials* finals.
La necessitat de nous materials, o més aviat la necessitat de "completar la carta de materials" disponible per a les TCTs no inclou només els plàstics sinó que posa èmfasi en la obtenció de prototips tant metàl·lics com ceràmics. Intrínsecament lligat al fet de la necessitat de nous materials, hi ha la necessitat de tenir noves propietats (com per exemple elasticitat o conductivitat) en els productes finals. I de la mateixa manera, les construccions i acabat superficial, també dependran en bona mesura de la resolució d'impressió mínima que permetin obtenir les composicions dels materials utilitzats.
- **Eficiència Energètica i Sostenibilitat:** Les tecnologies de prototipat ràpid han basat part de la seva propaganda en l'estalvi de material (comparant amb tecnologies substractives) i per tant en la seva sostenibilitat. Malgrat aquestes referències, cal dir que actualment el material emprat per fabricar peces mai és igual al 100% del material

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

amb que es carreguen els dipòsits dels sistemes productius sinó que tenen una minva considerable. El motiu és que en els sistemes de fabricació en plataforma (com per exemple en l'esmentat Sinteritzat SLS), el material no utilitzat però introduït a la màquina pateix una degradació progressiva que fa que sigui necessari descartar-lo després d'uns quants usos per evitar que les peces presentin defectes superficials en forma de "pell de taronja". En altres sistemes que no són de construcció per plataforma sinó que es fabrica amb l'aportació de material (com ara la deposició de fil de plàstic "FDM" o la deposició metàl·lica "LMD") també cal gastar material suplementari en suports o en passades per netejar el capçal de deposició.

D'altra banda, pel que fa a la eficiència energètica i tornant al cas de fabricació en plataforma (Sinteritzat SLS), el fet d'haver d'escalfar tot el material quasi fins al seu punt de fusió per aconseguir que l'escombrat del feix de làser sigui més ràpid i per tant la fabricació més econòmica comporta una despesa energètica no menyspreable en el còmput global.

- **Translació de Fabricació per lot a Fabricació seriada de productes únics:** Actualment totes les tecnologies de prototipat disponibles comercialment fabriquen peces (úniques o en petites sèries) mitjançant lots. Per tal de disminuir el cost de producció d'aquestes tecnologies s'haurien de trobar sistemes que poguessin ajudar a passar de sistemes de fabricació discrets a sistemes continus, de manera que es pogués augmentar la capacitat productiva i per tant reduir costos augmentant l'eficiència. Aquest repte de recerca s'està adreçant mitjançant sistemes de plataformes de construcció en carrusel i de tecnologies de post-processat en continu (el qual no és trivial doncs les plataformes són elements actius clau en la fabricació ràpida i les operacions de post-process són complicades i en molts casos s'acaben realitzant manualment.
- **Maquinària Híbrida:** Moltes de les tecnologies de prototipat ràpid necessiten allotjar columnes i subestructures (sovint en forma de panell d'abelles) per sustentar trams en voladís o pendents molt pronunciats. Aquestes estructures de suport s'han de retirar un cop les peces estan fabricades completament. En els casos de prototips plàstics, l'eliminació d'aquests suports és senzilla; doncs sovint es pot fer a mà o amb l'ajut d'algun tipus de bisturí. Per contra, en els casos de fabricació additiva metàl·lica és fa necessària algun tipus de màquina-eina suplementària, sovint un centre de mecanització multi eixos (tot i que en alguns casos també es poden utilitzar màquines de descàrrega elèctrica "EDM", rectificadores de superfícies o polidores) per aconseguir eliminar aquests excedents de material. En aquest cas, l'abordatge d'aquest repte s'està fent mitjançant la recerca i el desenvolupament d'implementacions de màquines híbrides, que combinen tecnologies additives i substractives en un sol centre de treball.
- **Fabricació al lloc de la demanda:** Les tecnologies de prototipat ràpid (que haurien d'obrir les portes a la fabricació directa) han estat durant molt de temps tecnologies cares i fora de l'abast de la majoria de professionals. Això ha fet que la materialització de prototips ràpids (o en alguns casos, peces funcionals) quedés reduïda a uns quants "centres de reprografia" capaços d'obtenir impressions i sèries curtes de producte que més tard eren expedides als llocs on es produïa la demanda. Amb l'eclosió de la fabricació personal i la comunitat *Maker* (Veure Annex 5), s'estan obrint les possibilitats de fabricació mitjançant béns d'equips senzills que fan possible que els usuaris puguin produir "impressions domèstiques" amb cost reduït, tot

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

apropant la oferta a la demanda. De fet, es preveu que la fabricació local doni un tomb al món de la fabricació, doncs canviarà per concret els paradigmes de la logística actual. En un món on es pugui produir localment, no s'haurà d'importar o exportar productes; sinó només matèria prima i dades. I per al trànsit de dades ja és disposa d'infraestructura suficient gràcies a Internet.

- **Fabricació bona a la primera:** Les tecnologies de fabricació tradicionals es fonamenten en la producció de grans lots en els quals es contempla una etapa de "Posada en funcionament dels sistemes" (en anglès "*Ramp up*") en la qual s'admet que hi hagi una determinada taxa de defectes, que més tard diluirà els seus costos en la producció llarga i seriada. Aquest paradigma, però, no és admissible en la fabricació de prototips i de sèries curtes, doncs la primera peça serà en molts cops la única que es produirà i a més els paràmetres de fabricació seleccionats difícilment seran aplicables a les peces que hagin de ser produïdes posteriorment.

Per aconseguir que els sistemes siguin capaços de fabricar peces bones a la primera s'estan utilitzant de manera intensiva les eines de Fabricació Intel·ligent, com els sistemes experts basats en la experiència o les eines de suport a la fabricació, que cada cop incorporen funcionalitats més potents per simplificar la feina de l'usuari. Tal com s'ha vist en el Capítol 7 de la present Tesi Doctoral, amb l'extensió de les tecnologies de fabricació a totes les llars i l'entrada d'usuaris no experts, el coneixement dels processos haurà de recaure cada cop més en els propis sistemes que no pas en els seus compradors. Fent el símil amb les impressores domèstiques de sobretaula actuals, una petita interfície de quatre o cinc botons haurà de ser suficient per imprimir qualsevol cosa; doncs la màquina ha de ser capaç d'ajustar els marges, l'escala, el reglatge de colors, etc.

A4.2. Enginyeria Concurrent i Anàlisi Integral del Cicle de Vida del Producte

El cas de *Apple* que s'ha comentat a l'apartat anterior és paradigmàtic en molts aspectes. Per exemple, és un paradigma de disseny avançat, d'utilització d'eines de disseny assistit per ordinador i també de fabricació deslocalitzada (com diu la pròpia companyia en els seus productes: "*Dissenyat a Califòrnia i Fabricat a la Xina*"). En canvi, és una companyia que té una gamma de productes relativament reduïda, i que basa els seus beneficis en fabricar moltes unitats de pocs ítems, que a més tenen una pervivència molt curta en el mercat.

Una altra manera d'aconseguir que els clients percebin un producte com altament innovador és apostar per la *customització* (o personalització) en massa del producte. La personalització en massa^[94] es defineix com *el procés mitjançant el qual les empreses de fabricació produeixen una gran varietat de producte amb preus i períodes de lliurament comparables a productes fabricats massivament*. Els prototips ràpids i la fabricació directa són eines per accelerar la innovació al llarg de tot el procés de desenvolupament i llançament al mercat de nous productes. A més, són eines que permeten aquesta fabricació personalitzada i per tant estan esdevenint les tecnologies d'avantguarda per al desenvolupament de productes disruptius.

Ara bé, dins els models de negoci existeix un altre factor molt important per al desenvolupament de producte: el seu cost. Alguns autors com I. Kelbassa^[95] han estudiat detingudament els costos de fabricació de productes en funció del seu volum i de la seva

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

complexitat. Les tecnologies tradicionals suposen costos elevats per a volums petits que van disminuint a mesura que augmenta la quantitat a produir. Per contra, aquestes mateixes tecnologies tradicionals de producció tenen costos baixos per a productes poc complexes, però aquests augmenten ràpidament quan la complexitat dels productes també augmenta (Veure Figura A4.2-1).

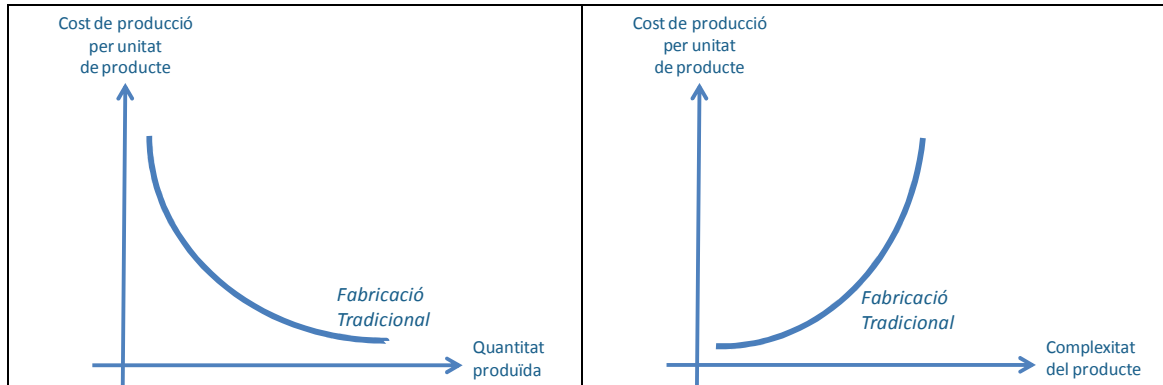


Figura A4.2-1. Costos de fabricació de producte amb tecnologies tradicionals. Esquerra: Costos de producte en funció del nombre d'unitats produïdes; Dreta: Costos de producte en funció de la Complexitat del producte produït.

Aquest fet és conegut per exemple en les tecnologies convencionals de mecanització. Mecanitzar una peça única té un cost elevat doncs cal preparar el programa de Control Numèric, les eines i en molts casos algun utilatge específic. I anant encara més enllà, abans de tot això, un operari expert ha de dedicar una certa quantitat de temps a decidir quina ha de ser l'estratègia de mecanització, quantes estacades s'hauran de realitzar, quines seran les millors màquines per a produir les peces i un llarg etcètera de qüestions obertes. D'altra banda, si en lloc de fabricar una sola peça se'n mecanitzen una sèrie molt llarga de peces iguals, els costos de preparació es diluiran entre el lot sencer i el preu unitari es reduirà. De fet, per a sèries molt llargues de producte, el més probable és que es dissenyin configuracions de màquines i sistemes de transport intern a mida, que tot i suposar uns costos inicials molt majors, acabaran resultant en un cost unitari molt més reduït.

El mateix exemple de la mecanització és vàlid per a explicar la qüestió dels costos en funció de la complexitat dels productes. Una peça complexa requerirà moltes operacions de mecanització, i per tant, l'encarirà. Per aquest motiu, moltes de les millores de disseny de producte en sèrie es centren en reduir operacions de fabricació o en eliminar característiques innecessàries de peces. Encara que en un producte es pot millorar el disseny de moltes altres maneres, la simplificació de les operacions de fabricació acaba essent la aposta estrella de la reducció de costos.

De totes maneres, aquestes correlacions de costos no apliquen a la fabricació "fotònica" o en general a les tecnologies de fabricació ràpida englobades dins les TCTs. De fet, per a aquestes tecnologies de fabricació, la corba de costos és invariant respecte a la quantitat fabricada o a la complexitat del producte (Veure Figura A4.2-2).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

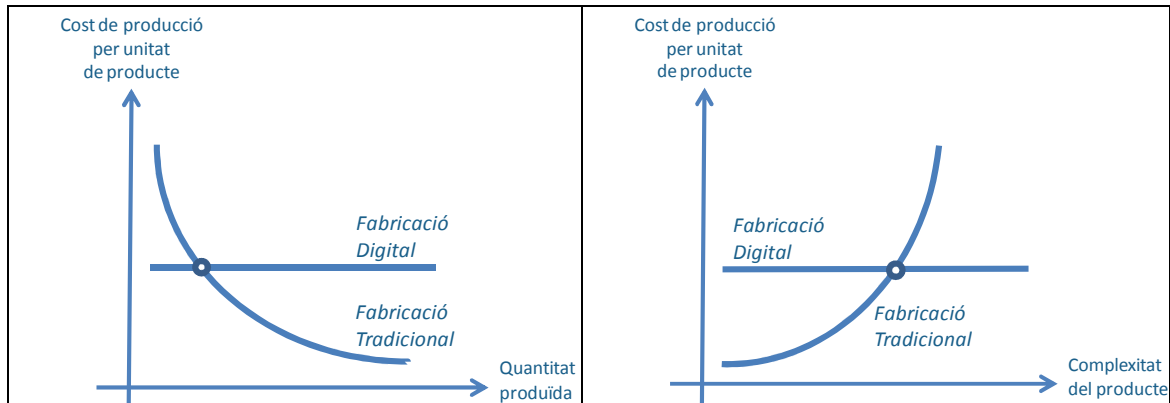


Figura A4.2-2. Costos de fabricació de producte amb tecnologies de fabricació ràpida superposades als costos d'obtenir els mateixos productes amb tecnologies tradicionals.

Prenent per exemple, per a una màquina de SLS (suposant que es treballa amb la plataforma plena), l'esforç de fabricar una única unitat o bé milers, suposarà el mateix cost unitari. I d'altra banda, la complexitat de les peces no influirà en el seu cost; si bé els paràmetres de referència seran l'alçada en plataforma i el seu volum efectiu de material en la construcció. Anant una mica més enllà, algunes de les geometries obtingudes a través d'algunes tecnologies de fabricació ràpida (com per exemple, utilitzant la fabricació additiva), no es podrien obtenir de cap altra manera, aquest cop sense importar la escala de cost (Veure Figura A4.2-3).

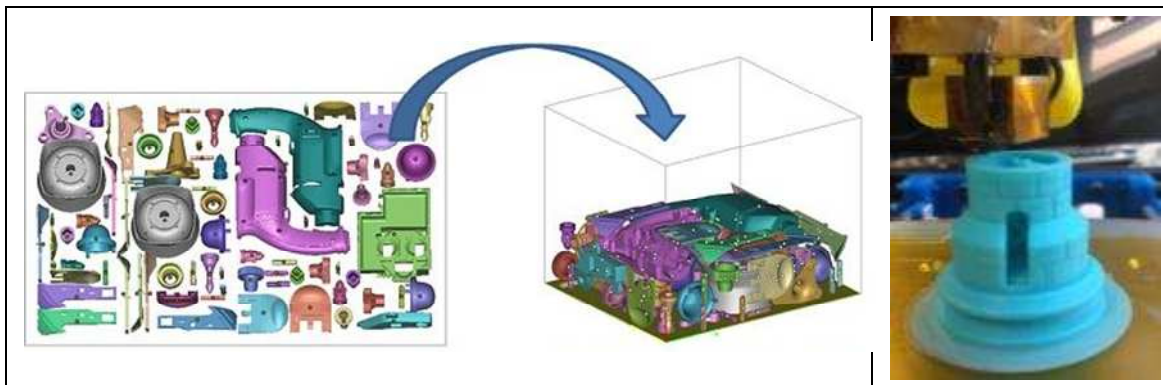


Figura A4.2-3. Esquerra: Plataforma de construcció exemple per a màquina de SLS; Dreta: Impressió 3D d'una torre d'escacs amb una escala de cargol interior, impossible d'aconseguir per mecanització. Font: Fundació CIM.

L'últim apunt d'aquest argumentari té a veure amb la obtenció del producte final desitjat. S'ha vist que existeixen una sèrie de tecnologies que permeten aconseguir prototips d'una manera molt ràpida. De fet, en l'actualitat és bastant comú que els dissenyadors facin la seva feina en horari habitual d'oficina (de 9 a 17h) i que enviïn per correu electrònic les seves peces per fabricar als centres de prototipat en el moment que acaben la seva jornada. Aquests centres estan preparats per carregar les màquines amb els dissenys i els materials i posar-les en funcionament per la tarda i durant la nit per a poder buidar-les a primera hora del matí i fer arribar les peces fabricades als dissenyadors en el moment que aquests tot just comencen la seva jornada laboral. Curiosament, en l'escala de temps dels dissenyadors, s'ha pogut invertir totes les hores útils al disseny i la fabricació dels prototips no ha costat cap temps.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Malgrat això, disposar de tecnologies per materialitzar prototips d'una manera ràpida no és suficient per aconseguir una arribada al mercat primerenca: el que cal tenir ràpidament és el producte final. El cas dels dissenyadors que s'ha comentat només és correcte per a dissenyadors que volen les peces tal qual surten de màquina, la qual cosa només és certa per a determinats tipus de peces, de materials i de dissenys. Per a molts altres productes (per exemple els prototips que han d'encaixar en els cotxes de saló que s'exhibeixen a les fires més prestigioses), els prototips s'han de polir, han de rebre una capa d'imprimació i s'han de pintar abans de ser lliurats al client. I en alguns casos, seran necessàries moltes hores i la dedicació de mà d'obra qualificada.

Per tant, tot i que els passos fets fins a la data són remarcables, cal fer un pas més enllà per aconseguir plenament la capacitat de "fabricació directa" per a cada cop més productes i aplicacions. I caldrà no fixar-se només en la part del desenvolupament del producte que va des de la concepció fins al prototip; sinó que caldrà ser capaç de disposar de medis productius que puguin abordar el desenvolupament de producte de manera integral: des del seu inici fins a la seva posada al mercat.

A4.3. Resposta als reptes de fabricació particularitzada a sectors i àmbits concrets d'aplicació

En el període de realització de la present Tesi Doctoral s'ha tingut la oportunitat d'estudiar, analitzar i implementar nous processos de materialització de producte personalitzat fent èmfasi a la necessitat d'arribar al producte final de manera ràpida.

Els casos més rellevants d'aquests projectes de materialització de producte (Productes del món biomèdic, Clúster de la joguina i Productes de consum) es descriuen en els apartats a continuació.

A4.3.1. El cas Biomèdic

El cas biomèdic és un cas paradigmàtic dins la taxonomia de desenvolupament de productes personalitzats d'alt valor afegit. La raó fonamental és que les persones envelleixen inexorablement; la qual cosa no agrada i en molts casos provoca pors. Per això, moltes institucions, administracions públiques o inclús persones a títol personal (mecenatge) que disposen de recursos, desitgen invertir-los en investigar i desenvolupar productes que ajudin a millorar les condicions de vida i la salut en general.

Aquest fet és molt explícit en el cas de les administracions públiques, que son les encarregades de vetllar per la qualitat de vida per als seus ciutadans. Amb l'augment de l'esperança de vida, les societats dels països del primer món tenen cada cop més una taxa de població elevada d'edat avançada; fent que l'envelliment saludable es declari obertament com un repte de la societat des d'Administracions com la Comissió Europea ^[96] o el Govern d'Espanya (Ministeri d'Economia i Coneixement) ^[97].

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Deixant de banda àrees mèdiques que també impliquen desenvolupament de productes com els lligats a la informàtica o la genòmica, el desenvolupament de producte "físic" en el cas biomèdic és de per sí molt ampli. Abasta des de l'equipament quirúrgic, els implants, les ortesis, els fàrmacs o fins i tot l'enginyeria de teixits.

En alguns casos concrets com el dels implants biomèdics, malgrat s'ha fet una àmplia investigació en relació amb la fabricació, modificació superficial i configuració de característiques com la seva integració òssia o la seva resistència estructural, encara hi ha un llarg camí per recórrer en el que es tracta de transportar els resultats de laboratori a la producció industrial. En d'altres casos, com ara la utilització de sistemes combinats de imatge mèdica per al diagnòstic lligats amb la fabricació de prototips de tumors per a la decisió i planificació d'operacions quirúrgiques, la tecnologia encara es troba a les beceroles.

El cas concret del desenvolupament de producte i de metodologies i processos de producció per al món de les pròtesis ha estat un camp de treball intensiu de la Fundació Privada Centre CIM de la Universitat Politècnica de Catalunya. No en va, les estadístiques apunten que als països considerats del primer món, una de cada 150 persones probablement necessitaran una pròtesi de maluc en els pròxims 30 anys i és evident que la millora de la tecnologia d'implants en un món que envelleix és important.

Cal entendre, doncs, el cas biomèdic (i en concret el desenvolupament de pròtesis) com un camp complex i exigent. Els esforços de recerca estan adreçats a respondre al que s'anomena el repte de les 5Ms, és a dir els reptes: *Mèdic*, dels *Materials*, de la *Modelització*, de la *Manufactura* i del *Mercat*, que es detallen a continuació:

- **M1: Repte Mèdic.** El món protèsic demana als seus productes objectius ambiciosos des del punt de vista mèdic. En primer lloc, és fonamental que una pròtesi no generi rebuig per part del pacient. Després, és important que el cos pugui créixer o fins i tot incorporar la pròtesi com a part del cos. Finalment, les tendències actuals també apunten a la introducció de medicaments en les pròpies pròtesis per poder curar malalties òssies o fins i tot d'altres parts del cos del pacient.
- **M2: Repte dels Materials.** Lligat a l'anterior, es demana una composició biocompatible i favorable a la integració òssia. Per aconseguir-ho, se sol recórrer a aliatges metàl·liques inoxidable combinades amb plàstics (comunament polietilens). Tot i això, recentment es demostra que és més favorable fer servir Ceràmiques Tècniques Avançades o polímers reabsorbibles; a poder ser amb elevades taxes de porositat i amb els porus interconnectats per a afavorir el creixement òssi.
- **M3: Repte de la Modelització.** Les tècniques avançades d'imatge (com per exemple la micro-Tomografia per Computador) són utilitzades per a la caracterització de les estructures però segueix existint una gran bretxa entre models teòrics i empírics o semi-empírics. Cal sens dubte fer un esforç per complementar la informació de modelatge virtual i per tant per lligar els sistemes de CAD i CAM necessaris per a un disseny adequat i una validació fiable CAE de les estructures òssies necessàries.
- **M4: Repte de Manufactura.** Els productes biomimètics són sens dubte els més complicats de replicar i les estructures òssies donen lloc a reptes majúsculs per a les tecnologies de fabricació. És necessari tenir tecnologies capaces de fer productes

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

personals (únics) en base a dades extrems d'imatge mèdica i materialitzats en certs materials i formes particulars. Només les qüestions de porositat interconnectada ja suposen un repte enorme, al qual se suma la necessitat de simplificar les operacions de postprocessat.

- **M5: Repte del Mercat.** El mercat del món biomèdic i en concret de les pròtesis es troba en mans d'unes poques empreses que dominen els canals d'arribada al mercat. En molts casos, aquestes empreses han estat les artífexs dels circuits de regulació de normativa de producte mèdic; que suposa una gran barrera d'entrada a empreses novells. Per a algunes petites empreses dedicades a la innovació en el disseny de material mèdic, l'única via d'explotació factible és arribar a acords de llicència o cessió de drets de propietat intel·lectual a les grans empreses dominadores.

Per a cadascun d'aquests reptes, existeixen indicadors d'anàlisi tant qualitius com des d'un punt de vista quantitau. Per exemple, el potencial de la regeneració òssia pot ser mesurat com un paràmetre de creixement en estudis *in-vitro* però també es pot avaluar a partir de la millora de la salut i qualitat de vida del pacient.

En aquest camp, l'autor de la present Tesi Doctoral ha tingut l'oportunitat de consagrar una ampla dedicació durant els darrers vuit anys que en molts casos ha culminat en comunicacions en revistes i congressos de prestigi Nacional i Internacional. A continuació es recull doncs la informació més rellevant dels projectes d'R+D+i col·laborativa més representatius en que s'ha participat en aquest període, així com les seves implicacions en la materialització ràpida de producte i en les necessitats i oportunitats per al desenvolupament de sistemes de fabricació intel·ligent que siguin capaços de donar resposta als reptes plantejats.

- i) Projecte PTR-CER: *Obtención de prótesis Cerámicas mediante la aplicación de tecnologías de impresión en 3D y fabricación substractiva*

El Projecte PTR-CER va ser finançat pel *Ministerio de Ciencia e Innovación* del Govern d'Espanya dins dels projectes del *Plan Nacional de I+D* de l'àmbit de "*Diseño y Producción Industrial*". Va tenir una durada efectiva de 36 mesos (des de Març de 2006 fins a Febrer de 2009) i es va realitzar en col·laboració entre la Universitat Politècnica de Catalunya (Centre CIM), La Universitat Ramon Llull (Institut Químic de Sarrià - Grup d'Enginyeria de Materials) i l'empresa Cerámica Industrial Montgatina.

L'objectiu del projecte va ser aprofitar els coneixements i la trajectòria d'una empresa ceramista tradicional dedicada a la fabricació de sèries molt llargues de vaixelles ceràmiques (en alguns casos de centenars de milers d'unitats) per introduir la fabricació ràpida de productes de molt més valor afegit però en sèries molt curtes: les pròtesis de genoll.

La innovació, doncs, es focalitzava tant en el producte com en el procés. D'una banda calia poder fer viable la fabricació ràpida amb Ceràmiques Tècniques Avançades (combinacions Alúmina-Zircònia que es formulaven en el mateix projecte) i d'altra banda calia posar en funcionament un sistema de gammes de pròtesis per tal que el cirurgià pogués escollir la pròtesi de les dimensions més adequades en funció del pacient i demanar la seva fabricació sota comanda.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Pel que fa al procés de fabricació, inicialment es va optar per explorar la via de la impressió en 3D de les Ceràmiques Tècniques Avançades mitjançant sistemes de fabricació per a prototips de guix disponibles comercialment (ZCorp). En el curs del projecte, donada la topologia de màquina que es va utilitzar, no va ser possible d'aconseguir cap pròtesi vàlida estructuralment per passar a les etapes de test posteriors amb cap de les composicions formulades *ad hoc*.

Per aquest motiu i donat que en el marc del projecte no tenia cabuda dissenyar de nou un sistema d'impressió en 3D, es va decidir passar a un abordatge de fabricació de les pròtesis mitjançant la mecanització de *pre-formes* completament en verd o fins i tot lleugerament pre-sinteritzades.

Aquest segon abordatge de la tecnologia de fabricació va ser un èxit i va donar lloc a l'establiment d'unes metodologies de subjecció de peces per a la fabricació ràpida de pròtesis de ceràmiques tècniques avançades. Dita metodologia (presentada per J.R. Gomà i J. Minguella a [98]) exigeix la integració del Disseny 3D, la Fabricació CAM i el Digitalitzat per a la verificació dimensional en el procés de fabricació (Veure Figura A4.3-1). De fet, donat que les geometries obtingudes per mecanització sobre les formes en verd s'han de sinteritzar en forn posteriorment, cal realitzar unes tasques importants d'enginyeria inversa per tal de dissenyar preveient la deformació que tindrà lloc al forn; i per tant, a l'hora de realitzar la mecanització cal donar lloc a una geometria diferent de la final desitjada (que s'obté mitjançant el canvi de forma durant la sinterització en el forn).



Figura A4.3-1. Simulació CAM i etapes de fabricació per a la mecanització de l'exterior i l'interior d'una pròtesis de genoll.

El producte desenvolupat va ser un producte molt complex i que estava sotmès a unes distorsions intricades en la seva etapa de sinterització (concretament una reducció de volum total i una deformació en el sentit d'obrir la geometria cap a les zones amb menys material). (Veure Figura A4.3-2). Per tant, va ser possible arribar a un disseny de fabricació per a la deformació particular però que era complicat i difícil d'extrapolar a altres productes de la gamma de pròtesis que tinguessin una geometria diferent.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica



Figura A4.3-2. Mesura del contorn d'una pròtesi de genoll: Geometria teòrica (contorn verd) i Geometria deformada obtinguda després d'un procés de sinterització (contorn vermell).

D'altra banda, el projecte en sí va ser un èxit, doncs tot i no haver desenvolupat una màquina capaç de materialitzar les pròtesis en una sola etapa, va ser possible establir una metodologia que combinava processos de mecanització i sinterització per fabricar peces: per tant, si hagués estat necessari s'hagués pogut realitzar un sistema de fabricació a mida per obtenir grans quantitats de peces que podrien ser totes elles diferents (personalitzades). Faltava, però poder tenir unes regles de disseny de debò que es poguessin fer servir per a una gama de producte molt més àmplia que el nínxol de mercat de les pròtesis de genoll.

ii) Projecte MATCh: *Monoblock Acetabular cup with Trabecular-like Coating*.

El Projecte MATCh^[99] va ser finançat per la Comissió Europa en el 7è Programa Marc de Recerca i Innovació dins el programa Específic "Research For the Benefit of the SMEs" (GA# 286548) i va tenir una durada de 24 mesos (des d'Octubre de 2011 fins a Setembre de 2013). Hi va participar un consorci format per quatre empreses (GTS del Regne Unit, FAME-MED de Turquia i EXEMPLAR d'Itàlia) i quatre entitats proveïdores de tecnologia (Politecnico di Torino d'Itàlia, ICI d'Islàndia i AIMEN i Fundació CIM d'Espanya)^[100].

El seu objectiu va ser augmentar la qualitat de vida dels pacients que hagin de requerir una operació de pròtesi de maluc mitjançant l'augment del temps de vida de la pròtesi, la millora del seu grau d'integració òssia i permetent l'ús d'un acoblament ceràmica-ceràmica de llarga durada també per a pacients que normalment no podrien beneficiar-se'n degut a limitacions tècniques del producte.

De fet, cada cop és més habitual que s'hagi d'implantar pròtesis de maluc en pacients menors de 50 i fins i tot per sota de 40 anys d'edat, els quals probablement acabaran necessitant dues o tres operacions de revisió al llarg de la seva vida (una cada 10 anys aproximadament) per aconseguir reemplaçar les parts danyades. En aquests casos, poder aconseguir un acoblament entre la part acetabular (maluc) i la bola (cap del fèmur) amb una taxa de desgast molt baixa és una veritable necessitat per tal de poder allargar la vida útil de la pròtesi.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Els elements acetabulars no cimentats que es poden trobar en el mercat actualment es caracteritzen per una configuració que comprèn una copa allotjada sobre una part metàl·lica per a la integració òssia de l'implant. Aquesta configuració té inconvenients d'alt risc derivats de la mobilitat relativa, del desgast de la copa i de la possibilitat de danys en l'os de la pelvis. Per tal de salvar aquests inconvenients, el projecte es va focalitzar en la creació de prototips d'una copa ceràmica desenvolupada sobre la base de la patent "*Monoblock ceramic prosthetic members*" WO2008/146322A2, que descriu una copa ancorada a l'os de la pelvis mitjançant un recobriment bioactiu trabecular que permet incrementar la integració òssia primària a curt i a llarg termini.

La copa materialitzada en el projecte no conté cap part metàl·lica i per tant permet l'acoblament ceràmica-ceràmica desitjat. A més, aquesta configuració permet una gamma més àmplia de mides de les pròtesis i un trauma menor durant la implantació quirúrgica. Els tests *in-vitro* realitzats en el transcurs del projecte demostren que els prototips són capaços d'accelerar la integració òssia i la previsió és que evitin l'afluixament asèptic a causa del desgast, la mobilitat relativa i dany en els ossos i que per tant (un cop superades les normatives mèdiques corresponents) es podrien utilitzar per a una gamma més àmplia de pacients.

Amb tot això, el projecte MATCh es va centrar fonamentalment en la materialització del procés de fabricació per obtenir les copes acetabulars que havien estat enregistrades en la patent ressenyada. A grans trets, les copes MATCh estan compostades per tres capes (Veure Figura A4.3-3):

- a) Copa Base de Ceràmica Tècnica Avançada: En forma de semiesfera és la capa que fa contacte amb el cap de fèmur en la seva part interior i que serveix de fonament per a l'addició de la resta de capes.
- b) Capa densa intermèdia de recobriment vitri: Serveix de substrat i unió entre la Copa ceràmica i el recobriment trabecular exterior.
- c) Recobriment Trabecular exterior: Capa amb porositat interconnectada que serveix per fomentar la integració òssia amb l'os del maluc.

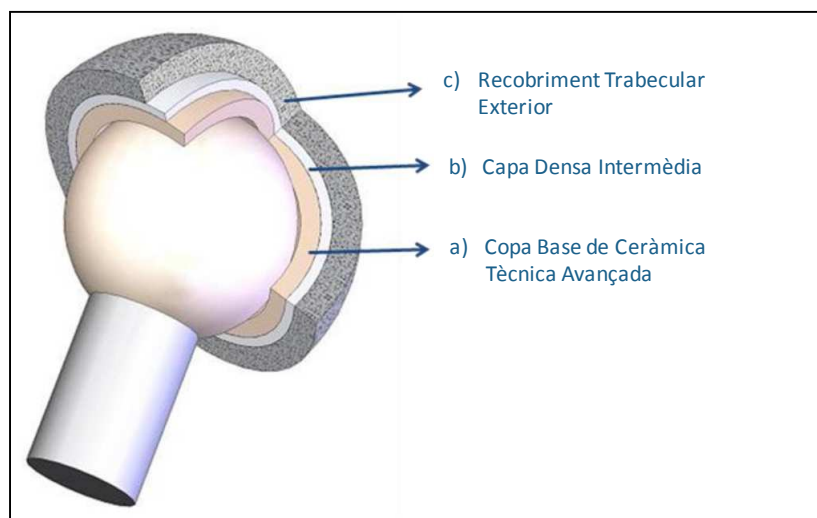


Figura A4.3-3. Estructura de 3 capes de la copa acetabular i el seu ajust amb un cap de fèmur.
Font: Projecte MATCh.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Els resultats d'aquest projecte van ser altament satisfactoris, doncs va ser possible materialitzar les pròtesis de maluc desitjades mitjançant l'aplicació de diferents tecnologies de fabricació: Mecanització i Sinterització per a la Copa Base (a), Recobriment per deposició a la Capa Densa Intermèdia (b) i Fabricació Additiva per a la obtenció de les estructures trabeculars del Recobriment Exterior (c) (Veure Figures A4.3-4 i A4.3-5). A data d'avui, els resultats estant sent disseminats en múltiples conferències i revistes no només del món de la fabricació com ara el fòrum proporcionat pel 5è congrés MESIC de la *Sociedad de Ingeniería de Fabricación* (SIF)^[101] sinó també del món mèdic, com a la Conferència CORS 2013^[102], la ESB 2013^[103, 104, 105, 106] o la ICALEO 2013^[107]. La mateixa Comissió Europea va escollir el projecte com a cas d'èxit particular.



Figura A4.3-4. Fabricació per mecanització de la geometria exterior de les Copes Bases Ceràmiques objecte del projecte. Esquerra: Fresatge exterior de la Copa. Central, J. Minguella, R. Uceda i R.M^a Rodríguez preparant mostres de copes a la Fundació CIM el 7 de Juliol de 2012. Dreta: Geometria de la Copa Base Mecanitzada amb èxit,

Des del punt de vista del tractament de les Ceràmiques Tècniques Avançades per a la seva mecanització i sinterització posterior, una de les diferències més grans entre aquest producte (pròtesi de maluc) i l'anterior (pròtesi de genoll) va ser que l'estudi del comportament d'una geometria simplificada (simètrica per revolució) va permetre donar lloc a unes regles de disseny possibles d'extrapolar a una àmplia gama de producte; no només a pròtesis de maluc sinó també espaiadors columnars o altres estructures en forma de gàbia.

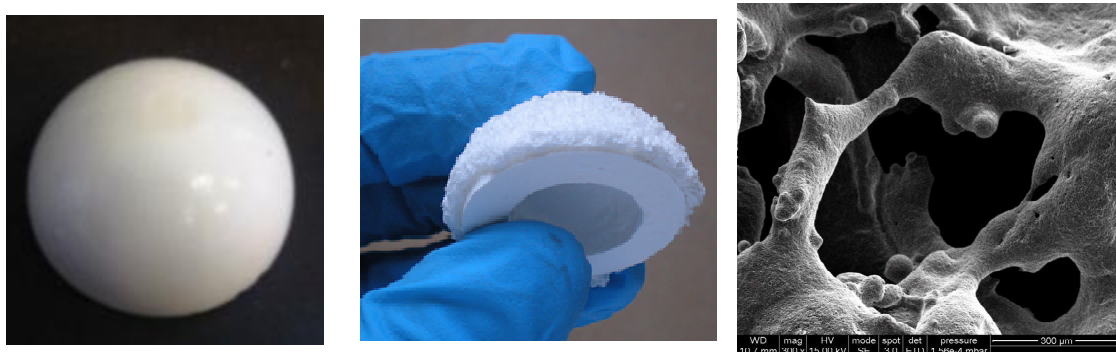


Figura A4.3-5. Esquerra: Copa Base recoberta amb la Capa Densa Intermèdia (acabat brillant), Centre: Copa acabada amb el Recobriment Trabecular Exterior. Dreta: Imatge obtinguda per Tomografia Computeritzada on es pot apreciar la porositat interconnectada de la capa trabecular exterior. Font: Projecte MATCH.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

D'aquesta manera, s'aconsegueix obtenir una metodologia de fabricació ràpida que es pot desplegar sobre una gama de productes molt àmplia. L'última frontera és doncs unificar les diferents tecnologies i processos en una sola màquina, capaç de dur a terme la materialització del producte d'inici a final.

iii) Impressió ràpida de pròtesis ceràmiques en 3D

En el moment de l'edició de la present Tesi Doctoral, l'autor col·labora en la preparació de nous sistemes d'impressió en 3D per a ceràmiques tècniques avançades. Els projectes en els que s'està col·laborant tenen un objectiu múltiple, lligat a tres dels reptes descrits a l'apartat A4.1.1:

- **Materials i Propietats:** Utilització de Ceràmiques Tècniques Avançades (disposicions d'Alúmina i Zircònia amb additius *gelificants* i *plastificants*) per assegurar les propietats desitjades amb una resolució d'impressió molt baixa (impressió de cordons de material de diàmetre igual a 50µm).
- **Translació de Fabricació per lot a Fabricació seriada de productes únics:** Concretament adreçat mitjançant sistemes de plataformes de construcció simplificades combinades amb tecnologies de post-processat en continu.
- **Fabricació bona a la primera:** Implementació de sistemes de fabricació intel·ligent en els programaris dels béns d'equip implementats per tal d'aconseguir fabricar correctament les geometries de pròtesis necessàries. A més, aquesta qüestió s'està complementant amb tècniques de *Disseny per a la Fabricació Additiva*, de manera que iteracions en el producte obtingudes gràcies a l'anàlisi mitjançant Elements Finitis poden introduir canvis en el disseny que siguin pertinents per treure el màxim profit de les tecnologies de fabricació a l'abast.

En el moment que aquests sistemes de fabricació estiguin llestos (l'horitzó dels dos projectes en marxa és finalitzar-los a principis de l'any 2016), s'estarà en disposició d'utilitzar sistemes de fabricació integrats que combinin en disseny en 3D, la fabricació i el post-processat de pròtesis en una sola interfície com el paradigma i-CAM presentat al Capítol 7 de la present Tesi Doctoral.

De fet, ja en les dates actuals -i a espera de poder consolidar aquests sistemes capaços de produir les pròtesis mitjançant la impressió en 3D-, s'està posant els fonaments per poder utilitzar en el mig termini una gama de materials que no necessitin processos de sinterització ulteriors, sinó que siguin capaços d'aconseguir la estabilitat mecànica necessària només amb el seu procés d'assecat natural, obrint la porta a incorporar a les pròtesis els medicaments tan desitjats des de l'àmbit mèdic.

A4.3.2. El cas de la Joguina

El món de la juguina ha canviat molt en els darrers temps. D'una banda, els seus clients (joves i no tan joves) han arribat a uns nivells d'exigència de qualitat de producte propis de sectors molt més avançats del que es podria pensar pel tipus d'utilitat que es dona a les joguines.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

D'altra banda, la saturació dels mercats i l'estat del benestar han propiciat que sigui un mercat amb preus baixíssims, que obliguen necessàriament a operar amb uns costos de desenvolupament molt reduïts per tal de generar beneficis.

Per motius eminentment de cost, la majoria de joguines es fabriquen massivament en països asiàtics com ara la Xina i les comandes (normalment de milers d'unitats) es fan arribar arreu per via marítima (o sovint intermodal combinant amb transport ferroviari i/o per carretera) utilitzant contenidors.

Aquesta manera d'enfocar la producció comporta dos problemes clars per al món de la Joguina:

- a) Obligació de fer comandes molt voluminoses (i per tant de renunciar a la personalització de producte), doncs els enviaments es fan per lots de moltes unitats iguals.
- b) Temps d'espera elevats (i per tant pèrdua de capacitat de reacció front a oportunitats esporàdiques en el mercat), doncs el temps d'arribada a Europa d'un lot fabricat a Àsia per via marítima pot allargar-se durant uns quants mesos.

Aquests dos problemes es podrien resoldre fàcilment si s'aconseguís relocalitzar la producció al punt on es produeix la demanda, però per fer-ho caldria aconseguir mitjans econòmicament molt més efectius.



Figura A4.3-6. Diferents maquetes de cotxe fabricades amb tecnologies diferents. D'esquerra a Dreta: Injecció, Sinteritzat Selectiu per Làser, Estereolitografia opaca, Impressió 3D en cera i Estereolitografia translúcida.

De fet, amb la revolució que han experimentat els videojocs i els jocs per Internet, ha aparegut tota una demanda de joguines físiques personalitzades que encara no ha pogut ser servida. En aquest moment, el mercat està a punt però la tecnologia no és capaç d'assolir les expectatives generades a un nivell de cost assumible pel consumidor.

Pel que fa als temps d'espera elevats i a la elevada planificació necessària, es tracta d'un factor que dilapida moltes oportunitats de negoci. De la mateixa manera que immediatament després de grans esdeveniments esportius es posen a la venda peces de roba personalitzades o formats de gravació que reproduïxen els partits jugats, també es podrien posar a la venda, per exemple, imatges dels jugadors més destacats aixecant el trofeu que tot just acaben de guanyar. Però malauradament, els mitjans productius actuals en el món de les joguines no són capaços de poder abastir una gran demanda en un espai tan curt de temps.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

A més, l'extremada planificació necessària fa que en el món de la joguina, cada nou producte sigui una aposta arriscada. Els productes s'han de fabricar per avançat en grans quantitats i introduir al mercat per veure la seva evolució. Una mala campanya de Nadal per a un producte en concret pot fer que una gran quantitat d'estoc acabi sent rebutjat; mentre que una quantitat insuficient de producte pot ocasionar una pèrdua de mercat potencial no abastit.

Amb aquest panorama no és d'estranyar doncs que els únics sectors que s'hagin llançat a la utilització de tecnologies de fabricació directa local hagin estat aquells que estan lligats al col·leccionisme més que no pas al joc en sí. Darrerament, algunes figuretes de jocs de rol que històricament havien estat realitzades mitjançant colades en metall (primer plom i més tard d'alumini) estan essent comercialitzades fabricades en resina de poliuretà mitjançant tecnologies d'Estereolitografia (SLA). Com que es tracta de figures amb una pervivència temporal relativament llarga, no existeixen tant riscos que les joguines quedin obsoletes abans de vendre'n una quantitat raonable. D'altra banda, el propi sector fa que els consumidors estiguin disposats a pagar imports més elevats, el qual equilibra els costos elevats associats a la seva producció.

i) Projecte de fabricació ràpida de figures personalitzades

Durant els anys 2010 i 2011, l'autor de la present Tesi Doctoral va dur a terme a la Fundació CIM de la Universitat Politècnica un projecte d'estudi de viabilitat de la inversió en una cèl·lula de fabricació per a l'obtenció de peces petites del món de la joguina.

L'objectiu inicial va ser avaluar els costos d'obtenció de petites figures mitjançant diferents tecnologies de fabricació additiva a l'abast, per tal d'aconseguir fabricar figures de manera ràpida, requerint poca mà d'obra i amb una alta flexibilitat per poder fabricar lots unitaris de peces essent econòmicament eficient. El resultat de les tecnologies a l'abast en aquell moment va revelar que tot i que amb determinades tecnologies es podia assolir un nivell d'acabats en línia amb el que es necessitava, el nivell de cost al que s'aspirava era força superior a l'objectiu fixat.

Donat que les operacions més intensives en mà d'obra eren les de pintat, l'empresa demandant de l'estudi va decidir fer un anàlisi detallat per plantejar la possibilitat d'implementar una línia automàtica únicament per al pintat de peces, capaç de treballar amb mides de lot unitàries. Per a aquesta segona part de l'estudi es van tenir en compte diferents tipus d'estacions de pintat i la utilització de màscares de pintura mitjançant la fabricació additiva, donant un nivell de costos només abordable per algunes games de producte amb major valor afegit.

Durant els anys posteriors, el desenvolupament dels equips d'impressió en 3D estan fent possible la utilització de multimaterial de colors diferents (com és necessari en figures que no seran pintades posteriorment per col·leccionistes) i amb un nivell de cost cada cop més reduït. En el cas límit, si aquests equips d'impressió 3D incloguessin els paradigmes de fabricació intel·ligent comentats anteriorment, podrien ser oferts als clients per a que ells mateixos fabriquessin les seves joguines amb alta definició i qualitat. Per això, el focus de millora segueix sent intentar arribar a un nivell d'acabat superficial cada cop millor (el desitjat per aquest tipus d'aplicacions) que ara per ara només es pot aconseguir amb la utilització d'etapes complexes de post-processat posterior, per exemple amb banys de vapor d'alcohol (Veure Figures A4.3-7 i A4.3-8).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

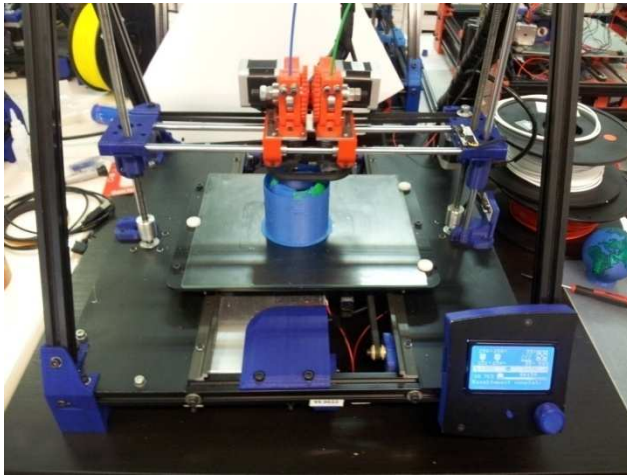


Figura A4.3-7. Esquerra: Màquina d'impressió 3D per FDM amb capçal multimaterial. Dreta: Figura impresa en FDM multimaterial.

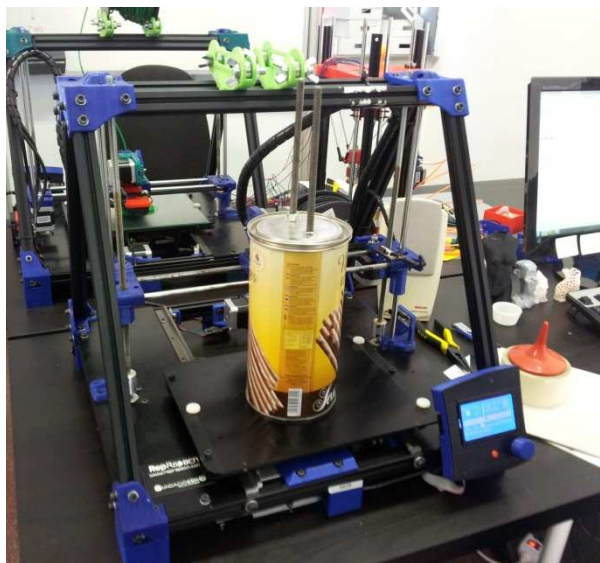


Figura A4.3-8. Esquerra: Dispositiu experimental per al tamisat de peces sobre una plataforma RepRap BCN3D+. Dreta: Figura impresa en FDM monomaterial a partir d'un disseny descarregat d'Internet a la qual s'ha aplicat el post-processat de tamisat amb boira d'acetona.

A4.3.3. El cas dels Productes de Consum

En contraposició amb els casos estudiats en els apartats anteriors (Cas del món Biomèdic i Cas del món la Joguina), els productes de gran consum són un dels camps funcionals on les tecnologies de fabricació directa tenen unes perspectives de penetració més elevades.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Comparat amb altres sectors, el dels productes de consum no té específicament massa requisits en quant al material. En aquest sentit, no és com l'automoció, que demana certs plàstics tècnics específics, ni com el biomèdic que cerca determinades composicions de Ceràmiques Tècniques Avançades. D'altra banda, per a la majoria d'aplicacions de la llar, en té prou amb acabats superficials modestos –no com en el cas de les joguines- i per tant tecnològicament es troba molt més a l'abast.

Tot i això, també a diferència dels casos anteriors, el repte en la majoria de productes de consum és aconseguir que el client percebi que obté algun benefici per tenir a l'abast productes de consum personalitzats i productes de consum produïts massivament. Sense aquest canvi en els consumidors tot i la magnífica oportunitat tecnològica, els processos de fabricació aplicats a aquest tipus de productes seguiran sent els propis de la fabricació seriada i el factor competitiu primària continuarà essent quasi exclusivament el seu preu en el mercat.

En casos com aquest, tinguin lloc o no la utilització de tecnologies de fabricació directa, la introducció de sistemes intel·ligents de fabricació és molt rellevant per a la fabricació de línies de producció altament flexibles. Gràcies a aquests usos, les línies de producció convencionals que treballen “a cegues” poden convertir-se en línies conscients, capaces d'interpretar el que succeeix en el seu entorn i aprendre a mesura que fabriquen, o tal com s'ha presentat en el Capítol 4, realitzen experiments i executen tasques de muntatge.

i) Projecte de la “Estació de Muntatge Universal”

Durant els anys 2006 i 2007 la Direcció General de Recerca de la Generalitat de Catalunya va finançar la Xarxa de Referència en Tècniques Avançades de la Producció (XaRTAP) per dur a terme un projecte sobre estacions de muntatge intel·ligents. En aquell projecte hi van participar fins a un total d'onze grups de recerca pertanyents a la xarxa i les etapes inicials de l'Estat de l'Art van permetre assentar les bases per a molts dels aspectes abordats durant l'elaboració de la present Tesi Doctoral.

L'objectiu del projecte responia tant a un repte tecnològic com a un repte industrial important. D'una banda, es tractava de materialitzar una estació de treball àgil, capaç d'incorporar paradigmes de fabricació intel·ligent per a la obtenció de béns de consum fruit de diferents casos d'estudi proporcionats per les empreses BJC© i Taurus©. D'altra banda, es tractava de donar resposta a una necessitat tècnica important per mantenir la competitivitat d'empreses que mantenen la implantació local i no deslocalitzada. Dos dels casos d'estudi més representatius analitzats en el mar del projecte van ser els anomenats “Ensamblatge E4” i “Ensamblatge E6” (Veure Figura A4.3-9).

L'ensamblatge E4 (connector de telèfon de BJC©) es va escollir perquè representava un clar exemple de procés de muntatge purament seqüencial. La particularitat d'aquest tipus de procés és que permet utilitzar la primera peça com a base per anar integrant la resta, sovint sense necessitat de deixar-la anar i tornar a recollir. Aquest tipus d'ensamblatge està molt present a la indústria.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica



Figura A4.3-9. Ensamblatges E4 (esquerra) i E6 (dreta); que van ser dos dels casos d'estudi analitzats en el projecte "Estació de Muntatge Universal".

Per la seva banda, l'ensamblatge E6 (cafetera automàtica de sobretaula de Taurus©) requeria un procés de muntatge en forma d'arbre amb ramificacions. En aquests processos cal realitzar una sèrie de petits ensamblatges a partir de peces que després es combinaran per a obtenir el conjunt final desitjat. És important tenir present que les topologies en arbre són la combinació de processos lineals i s'han de decidir al dissenyar l'ensamblatge. La implementació d'aquestes topologies té una sèrie de conseqüències directes sobre la planificació i la operació de la producció, com per exemple la necessitat d'introduir un espai de treball on dipositar els ensamblatges en curs o la previsió de la necessitat de deixar anar els ensamblatges per tornar-los a agafar posteriorment.

La solució implementada va ser una cèl·lula complexa amb un sistema de control distribuït i en el que interactuaven els diferents subsistemes diferents. Entre d'altres, com s'ha comentat al Capítol 6, s'hi van posar en funcionament dos tipus de robots diferents (un SCARA de 4 eixos i un antropomòrfic de 6 eixos) i altres dispositius com una taula de posicionament i orientació de peces per bufat amb doll d'aire (que s'utilitzava com a sistema d'alimentació altament flexible) i una cèl·lula d'inspecció mitjançant visió per computador per a la identificació i validació de producte (Veure Figura A4.3-10).

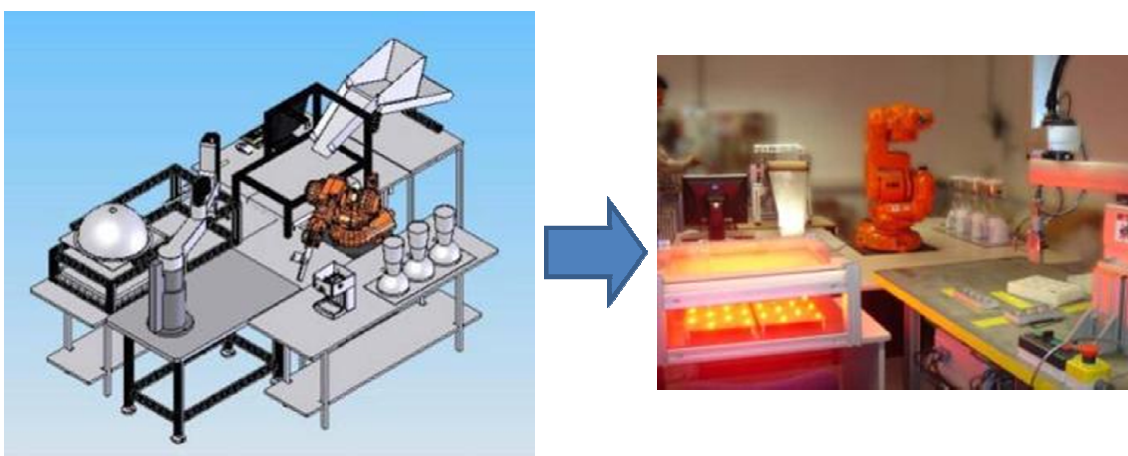


Figura A4.3-10. Disseny en 3D de l'estació de treball àgil dissenyada en el marc del projecte "Estació de Muntatge Universal" i materialització del prototip.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Tal com s'ha detallat en el Capítol 6, els subsistemes que composaven l'estació de muntatge universal materialitzada van ser:

1. Sistema d'Alimentació
2. Sistema d'Identificació i Posicionament
3. Sistema de Verificació
4. Sistema de Subjecció
5. Sistema de Muntatge
6. Sistema de Control
7. Sistema de Gestió de la Producció

El nivell d'abstracció amb que es va treballar en el projecte va ser molt elevat. Es tractava no només de tenir una solució particular prou bona per satisfer les necessitats dels muntatges seleccionats com a casos d'ús, sinó també de definir una especificació prou genèrica i ambiciosa per poder desplegar-la en un gran nombre d'implementacions que poguessin necessitar la introducció de sistemes de fabricació àgils.

Per això, els subsistemes basats en aplicacions informàtiques (Sistemes 6 i 7 relatius al Control i la Gestió de la Producció) es van poder tractar com a casos genèrics, mentre que per als subsistemes basats en entitats físiques (1. Alimentació, 2. Identificació i Posicionament, 3. Verificació, 4. Subjecció i 5 Muntatge) es va optar per dissenyar una especificació genèrica d'alt nivell per als treballs teòrics i alhora desenvolupar una materialització específica que donés solucions flexibles però particularitzades per donar resposta als casos d'ús. En qualsevol cas, cal ressenyar que en la selecció dels casos d'ús s'havia procurat mantenir un ampli espectre representatiu dels casos que es poden trobar en els muntatges industrials reals.

L'especificació conceptual de l'Estació de Muntatge Universal és la que mostra la Figura 4.3-11, en la qual es pot trobar una especificació de grups d'elements que actuen com a recursos compartits per a la materialització dels 7 subsistemes definits.

En efecte, per poder realitzar una operació de muntatge es requereixen dos grups (en el diagrama, en forma de dues mans muntades sobre arquitectures robòtiques) un dels quals actua com a grup de subjecció i l'altre com a grup de manipulació. Ja es veu, doncs, que el recurs necessari per fer el muntatge serà en realitat un recurs compartit doncs també haurà de realitzar treballs d'alimentació i transport de peces. Més encara, per tal de poder tenir una alta flexibilitat respecte a les peces que s'hagin de manipular, és necessari tenir un "magatzem de mans" que serviran tant per al sistema encarregat de la subjecció com de l'encarregat de la manipulació.

Com que la concepció de l'Estació de Muntatge ha de propiciar l'Adaptabilitat i Reconfigurabilitat, aquesta abstracció també deixa lliure la configuració dels diferents elements que la componen. Per a fer-la més específica, però, es delimiten una sèrie d'espais de treball (Pla d'Identificació, Pla de Rebuig, Pla de Muntatge, Pla de Verificació i Palets de Peces Acabades) que descriuen les diferents subestacions bàsiques per a cadascuna de les tasques que composaran les activitats de fabricació. En qualsevol cas no es tracta d'una conceptualització tancada, sinó que queda prou oberta com per a introduir-hi nous elements i grups funcionals.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

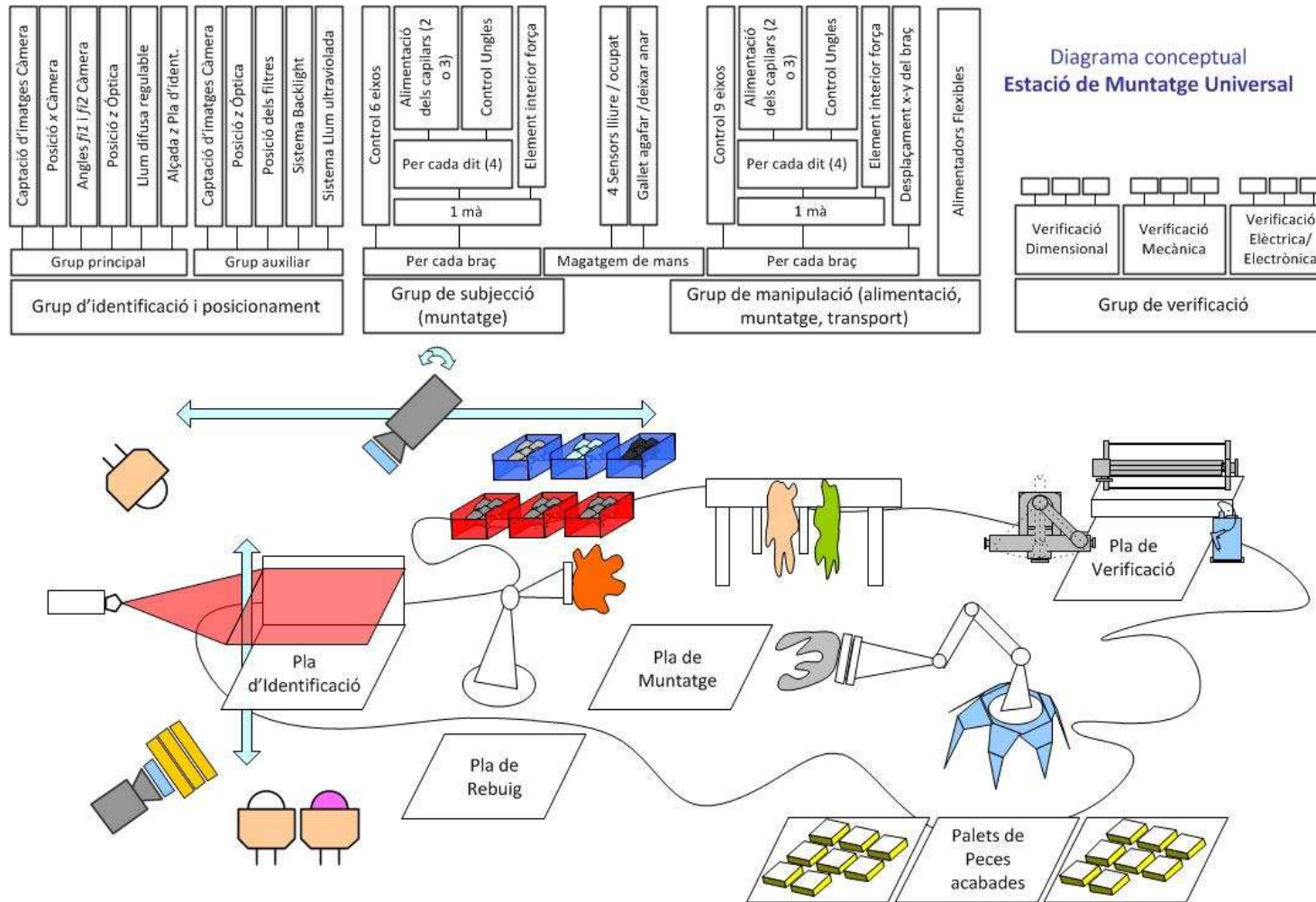


Figura A4.3-11. Diagrama conceptual de l'“Estació de Muntatge Universal”.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Com s'ha comentat, en el transcurs del projecte es va construir un demostrador del sistema capaç de dur a terme una sèrie de tasques de muntatge previstes en la definició de casos d'ús.

Pel que fa a la introducció de les especificacions de client i la planificació de la Producció, es va realitzar un estudi exhaustiu en la comparació de les diferents solucions proposades al plantejament d'un mateix problema, fent servir exactament les mateixes dades introduïdes del model; utilitzant-lo en escenaris específics de producció -ja que podia admetre interfícies completament personalitzades per a cada usuari- i mòduls de càlcul per incorporar tot el coneixement d'escenaris industrials específics.

Respecte a l'alimentació de peces, es va operar amb les diferents solucions proposades per a dotar d'una màxima universalitat a l'estació de muntatge, assolint altes fites de flexibilitat mitjançant les molt diverses arquitectures. Complementàriament, els experiments del sistema de visió van abordar la part d'il·luminació i adquisició de dades, la part de comunicació i sincronització amb el manipulador, i la part de control de qualitat de les peces. La comunicació i sincronització del sistema de visió amb el manipulador va ser objecte d'una prova de concepte real als laboratoris de la Fundació CIM, on es va realitzar el muntatge de l'estació. De la mateixa manera, també es van testejar les comunicacions entre el programari del sistema de visió i el dels manipuladors, així com també la transferència i interpretació de dades.

Els experiments de muntatge es van fer amb un total de 57 peces de productes de les empreses col·laboradores. Per a cada peça i producte complert, es va programar el sistema per a que fos capaç de realitzar un control de qualitat individual per tal de comprovar que s'acomplien tot un seguit de requeriments que figuraven en una llista proveïda per la xarxa; com ara característiques de mesura, forma, dimensions i que totes aquestes característiques es trobaven dins les toleràncies i cotes indicades.

Tot i que donat l'abast del projecte, el nombre de peces que podia muntar aquest sistema de producció àgil va ser reduït, sí que va ser un demostrador vàlid per a les necessitats de sistemes intel·ligents de producció i per a les possibles vies de resolució de dites necessitats a través dels paradigmes de fabricació intel·ligent i de "sistemes de producció conscients".

Annex 5. Sistemes de fabricació intel·ligent lliures i oberts

A5.1 Moviments en matèria de Sistemes de fabricació Lliures i Oberts. *RepRap*: La Comunitat “*Maker*” de la impressió 3D

Corria el mes de Març de l'any 2005 quan el Professor Dr. *Adrian Bowyer* [108] de la Universitat de Bath (Regne Unit) i un grup de col·laboradors van decidir començar el que van anomenar com a Projecte *RepRap*. Es tractava d'aconseguir una màquina d'impressió en 3D que fos capaç d'imprimir la majoria dels seus components. Així doncs, naixia el concepte de la “auto replicació”, amb el que els seus creadors van anomenar “*Replicating Rapid Prototyper*” o *RepRap*.

El Projecte, que va obtenir finançament de la “*UK's Engineering and Physical Sciences Research Council*”, va ser un èxit i va donar lloc a tota una família de models de màquines anomenades *Darwin* (any 2008, amb estructura en forma de cub), *Mendel* (any 2009, amb estructura en forma triangular) i *Huxley* (any 2010, corresponent a una versió miniaturitzada de la *Mendel*). (veure Fotografia a la Figura A5.1-1).

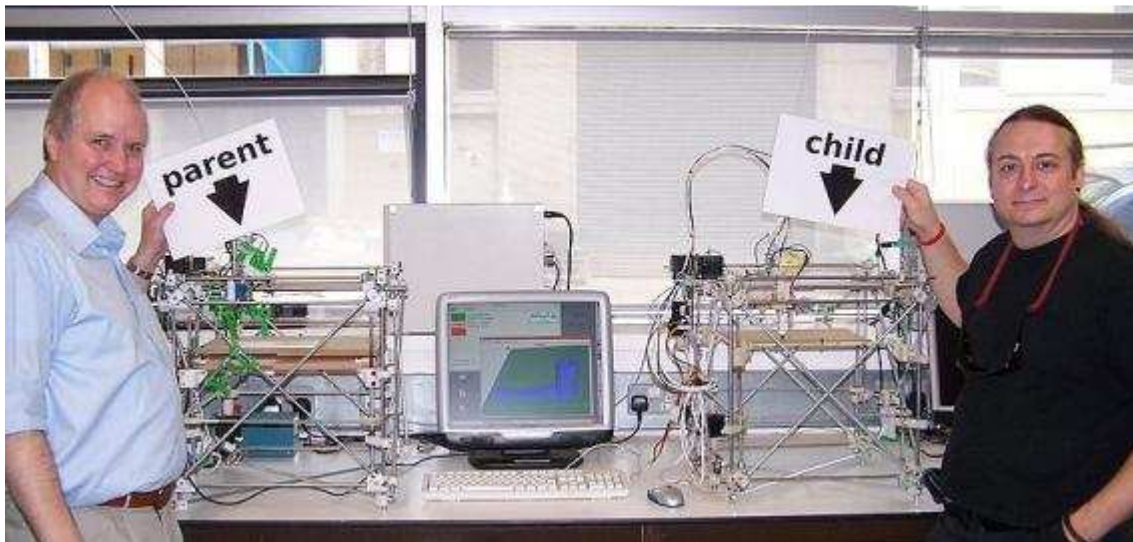


Figura A5.1-1. 29 de Maig de 2008. Adrian Bowyer (esquerra) i Vik Olliver (dreta), iniciadors del Projecte RepRap, mostren una màquina *RepRap* mare fabricada amb sistemes convencionals de prototipat i una màquina filla amb peces impreses per la màquina mare. Font: [109]

En gran part, però, l'èxit del projecte va venir no de la tecnologia utilitzada en sí, sinó en el concepte de treball obert i en comunitat. Segons explica la mateixa web del projecte, a finals de Setembre de 2008 ja es tenia constància de més de 100 màquines fabricades arreu; de fet, el nombre exacte de màquines *RepRap* en circulació ja era desconegut.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

D'aquesta manera, un cop es va llançar de manera oberta la primera *RepRap Darwin*, tota la comunitat "*Maker*" (veure Capítol 7), que en origen es va articular sobre una xarxa de *blogs* i entorns oberts de comunicació en *Wiki Media*, va poder començar a evolucionar dissenys i contribuir a l'avenc de la família tecnològica *RepRap*.

És evident que les tecnologies d'impressió 3D són molt atractives i que cada cop més apareixen en els medis de comunicació com a estàndard de la 4^a Revolució Industrial. Però, Què va fer que la comunitat *Maker* és bolqués en aquest projecte i no en d'altres? A més del treball en xarxa, poden atribuir-se dos factors complementaris que han facilitat enormement el seu desenvolupament: (i) *la utilització d'una tecnologia d'impressió 3D no subjecta a patents ni llicències* i (ii) *la filosofia intrínseca de la fabricació a baix cost*.

Sovint quan s'utilitza la denominació de *Impressió 3D* o *Fabricació Additiva* en totes les seves variants i matisos (3DP – *Three Dimensional Printing*, AM – *Additive Manufacturing*, ALM – *Additive Layered Manufacturing*, RM – *Rapid Manufacturing*, etc.) no es té en compte el principi tecnològic específic segons el que funcionen les màquines en qüestió. En aquest sentit, les màquines *RepRap* utilitzen un principi de funcionament de deposició de fil fos; però en lloc de ser l'estàndard "*FDM*" (*Fused Deposition Modelling*) n'utilitza una altra versió pròpia anomenada "*FFF*" (*Fused Filament Fabrication*), de manera que no es veu subjecta a patents ni llicències.

Aquest factor diferencial tindrà molta repercussió en els anys propers, doncs donarà al substrat *Maker* la capacitat d'aplicar els coneixements en el disseny i desenvolupament de màquines obtinguts en el marc *RepRap* a d'altres tecnologies d'impressió en 3D protegides per patents que estan properes al seu alliberament legal: concretament el *Sinteritzat Selectiu per Làser* (SLS) i la *Estereolitografia* (SLA).

Finalment, un segon fet destacable que ha ajudat a l'impuls del desenvolupament dels sistemes d'impressió *RepRap* de manera cooperativa i deslocalitzada ha estat el fet intrínsec d'intentar fabricar totes les peces que la componen tot mantenint un baix nivell de cost. Les diferents versions dels sistemes d'impressió *RepRap* sempre s'han mantingut per sota de les 1000 lliures esterlines per kit complet, contenint moltes peces que es podien fabricar els mateixos *Makers* sense haver-les de comprar (per exemple, peces estructurals que es poden fer de fusta). En paral·lel, l'estructura oberta dels dissenys, han facilitat la incorporació de millores i redissenys també de cost baix, esperonant un repte tecnològic de desenvolupament constant.

El moviment *RepRap* original va ser el primer que va implicar el desenvolupament d'impressores 3D de baix cost i de codi lliure i obert. Ràpidament es va convertir en el sistema d'impressió 3D més utilitzat entre la comunitat *Maker* i va generar moltes iniciatives complementaries. Algunes d'elles són sense ànim lucratiu, com les que es comenten en els apartats a continuació. D'altres tenen al darrere un esperit emprenedor. De fet, el mateix Professor *Bowyer* –que es va retirar de la vida acadèmica l'any 2012-, dirigeix de manera jubilar l'empresa *RepRap Professional, Ltd* [¹¹⁰], dedicada a la venda d'impressores 3D de codi obert en format *kit* de muntatge i a la impartició de cursos relacionats amb aquestes tecnologies.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

A5.2 Sistemes de fabricació locals per a un món global. El cas RepRapBCN de la Fundació CIM

La *Fundació CIM* [¹¹¹] (amb acrònim de l'anglès, *Computer Integrated Manufacturing*) és una Fundació Privada sense ànim de lucre inscrita dins l'entorn de la *Universitat Politècnica de Catalunya* UPC-BarcelonaTECH, dedicada a la generació i transferència de coneixement en l'àmbit de les tecnologies avançades de la producció. D'aquesta manera, el *Centre CIM* és un pol tecnològic universitari amb esperit no lucratiu, que fomenta la materialització de noves tecnologies per a la millora de la competitivitat d'empreses i professionals del món de la fabricació industrial.

Creat l'any 1989, el *CIM* va ser un dels primers centres de l'estat espanyol en disposar d'equips d'impressió 3D a les seves instal·lacions de *Planta Pilot*, amb l'adquisició de sistemes de SLA, SLS i d'impressió en cera a la dècada dels noranta. Paral·lelament, en les Àrees d'Activitat dedicades a la realització de *Projectes d'R+D+i* i la *Formació de professionals tècnics*, es van anar acumulant experteses en el disseny i implementació d'arquitectures de màquines i en la facilitació d'itineraris formatius dins l'anomenat "*Programa d'Acompanyament Professional CIM*", o "*PAPCIM*".

L'any 2010, gràcies a l'entrada en un Projecte Europeu de l'esquema de finançament "*Leonardo da Vinci*", el *CIM* va poder adherir-se a la iniciativa *RepRap* i va començar a materialitzar impressores de baix cost sota un paraigua que es va anomenar projecte *RepRapBCN* [¹¹²].

En realitat, però, la primera impressora realitzada a la Fundació CIM no es va implementar en l'arquitectura de varetes roscades pròpia de les *RepRap*, sinó que es van materialitzar sobre la base d'una impressora del fabricant "*3D Systems*" (*ThermoJet*®) de tres eixos mòbils retrofitada amb un capçal d'extrusió de filament plàstic (Veure Figura A5.2-1). En aquells primers moments, -tal com s'ha comentat al Capítol 6- no només es van explorar les tecnologies de deposició de plàstic sinó que també es van realitzar proves de concepte fins i tot en tecnologies de deposició de fil metàl·lic mitjançant el procés de soldadura de gas de Tungstè. No obstant aquestes primeres proves exploratòries que és possible que siguin represes en el futur, es va preferir concentrar-se en els processos de deposició de fil plàstic i es va adoptar l'arquitectura *RepRap Mendel* com a plataforma per desenvolupar-hi millores.



Figura A5.2-1. Any 2010: José Miguel Abreu, becat pel programa Leonardo da Vinci, executant proves en la primera impressora implementada pel CIM. Dreta: Moment per a la història: La primera impressora 3D de deposició de fil entra en funcionament amb èxit.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Els fruits de *RepRapBCN* han estat destacables tant a nivell tecnològic com a nivell humà. En només 4 anys s'ha aconseguit dissenyar i arribar a distribuir impressores 3D que milloren en molt les prestacions que oferien les famílies de màquines de *RepRap* originals, tot mantenint l'esperit de programari i maquinari lliure i obert (veure figura A5.2-2).

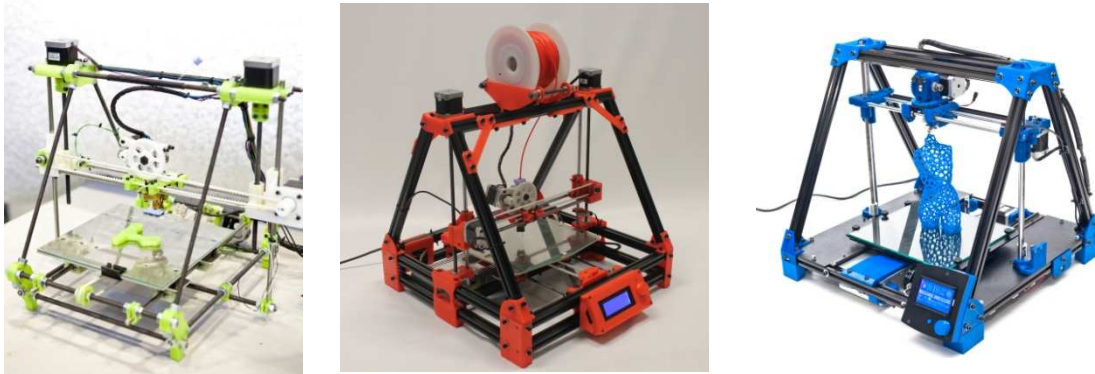


Figura A5.2-2. Fotografies de tres generacions de màquines materialitzades en el marc del Projecte *RepRapBCN*: *Mendel Prusa*, *BCN3D* i *BCN3D+*. Font: Fundació CIM.

Ja a finals de l'any 2011, el projecte *RepRapBCN* era prou madur i va començar a oferir *kits* de peces per muntar màquines, si bé la majoria de peces de plàstic que incorporaven no estaven fabricades per replicació de la mateixa màquina. A principis de 2012, la màquina va començar a incorporar noves funcionalitats com una interfície electrònica que la feia autònoma mitjançant l'ús de targetes de memòria tipus SD com les utilitzades en càmeres de fotografia digital. A partir d'aquesta fita, el projecte va créixer notablement i va aconseguir generar una massa crítica de coneixement que va permetre a la Fundació CIM fer exercicis de màquines com el que es va anomenar "*MendeIMAX*", corresponent a una màquina amb unes dimensions de volum d'impressió molt superiors a les assolides fins a la data.

El gener de 2013, gràcies a l'experiència acumulada, es va presentar comercialment un model disruptiu amb l'arquitectura original: la impressora BCN3D. Aquesta nova impressora incorporava una estructura més rígida, construïda amb perfils d'alumini que facilitava un volum útil d'impressió de 210x210x180mm. D'aquesta manera, es dotava de major rigidesa al sistema de fabricació i s'hi integraven confortablement funcionalitats com el monitor i l'electrònica.

El setembre de 2013 es va presentar la nova impressora BCN3D+ amb el principal objectiu d'aconseguir una màquina amb menys components i molt més senzilla de muntar. A més, la nova BCN3D+ millora en precisió (el guiatge de l'eix Y es realitza amb guies lineals), en nivell de personalització (el capçal es pot substituir per un altre dispositiu només enretirant dos cargols *allen*), en usabilitat (el panell d'interacció de l'usuari és més gran i intuïtiu) i sobretot amb un major volum d'impressió (240x210x200mm) tot mantenint les dimensions exteriors de la seva predecessora (Veure Figura A5.2-3).

En paral·lel al desenvolupament de les topologies de les impressores BCN3D, el projecte *RepRapBCN* també ha anat integrant funcionalitats i millores com el *ventilador de capa* o nous extrusors amb funcionalitats de recuperació de fil (*retract*) o fins i tot nous extrusors per a la fabricació amb pastes com sucres i xocolata (*paste extruder*).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

	BCN3D (Gener de 2013)	BCN3D+ (Setembre de 2013)
Volums útils de construcció de peces (X, Y, Z)	210 x 210 x 180 mm	240 x 210 x 200 mm
Interfície d'usuari en màquina	LCD	LCD gràfica
Guiatge Eix Y	Barres calibrades	Guies lineals
Capçal d'extrusió	Hotend v5	BCNozzle
Auto-Replicabilitat	Parcialment Replicable	100% Replicable
Dificultat Calibració	Mitjana	Baixa
Temperatura Màxima de Treball de la Plataforma	85°C	120°C
Cost dels Materials	575€	420€

Figura A5.2-3. Taula comparativa entre les característiques de les impressores BCN3D i BCN3D+.

A nivell humà, es pot dir que s'ha fet un esforç titànic per contribuir en tot el possible a la filosofia inicial del projecte *RepRap* a nivell mundial. S'ha assistit a esdeveniments i fires, s'han organitzat regularment activitats de tipus "Workshop" sobre fabricació digital, s'ha mantingut el contacte amb la comunitat *Maker* (veure Figura A5.2-4) i sobretot s'han ofert sempre de manera gratuïta i oberta tots els desenvolupaments materialitzats en el recorregut del projecte *RepRapBCN*.



Figura A5.2-4. Presentació a la TCT2013 de Birmingham de la *BCN3D+*. Dos membres de l'equip de *RepRapBCN* (Albert Campos i Eric Pallarés) amb el professor Bowyer. Font: Fundació CIM.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Amb una perspectiva de quatre anys, el Projecte RepRapBCN ha esdevingut una incubadora de professionals (ha dotat la col·laboració de més de 30 beques a estudiants de Graus i Màsters de carreres tècniques) i ha desenvolupat un coneixement en matèria de fabricació digital que està sent explotat en diversos projectes de Recerca Internacional, per exemple del 7è Programa Marc (Veure Figura A5.2.5).



Figura A5.2-5. Any 2013: Vista parcial de l'espai de treball RepRap a la Fundació CIM, que compta amb una granja de 25 impressores en ple funcionament. Font: Fundació CIM.

El seu dinamisme va permetre la posada en funcionament l'any 2012 d'una Aula d'impressió 3D a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB – UPC) (Veure Figura A5.2-6) i des de la primavera de 2013 va començar a col·laborar amb l'arrencada de les activitats del primer Ateneu de Fabricació posat en funcionament per l'Ajuntament de Barcelona al Districte de Les Corts (Veure Figura A5.2-7).



Figura A5.2-6. Juny de 2013: Aula d'Impressió 3D de l'ETSEIB (UPC) amb 3 màquines RepRap. Font: Fundació CIM.

Precisament en aquest espai de recent creació s'ha pogut donar una altra volta al concepte de Replicació Ràpida: tal com s'ha comentat, la comunitat de *Makers* no està només restringida a

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

la utilització d'impressores per a la materialització de productes, sinó que es beneficia de moltes altres tecnologies de fabricació per obtenir productes o parts de màquines. D'aquesta manera, a l'Ateneu de Fabricació s'hi poden trobar moltes altres tipologies de màquines com ara Centres de Mecanització, Màquines de tall o Màquines de Conformat. Així, s'aconsegueix el fenomen social de la posada a l'abast de tothom dels sistemes avançats de fabricació, en un entorn lliure i obert, on tothom és benvingut per fer aportacions o bé de començar el seu projecte per a que qui vulgui pugui contribuir en ell.



Figura A5.2-7. Desembre de 2013: Ateneu de Fabricació del Districte de Les Corts durant l'execució d'un Workshop d'impressores BCN3D+. Font: Fundació CIM.

A5.3 Programari lliure i obert per a Sistemes de fabricació. El cas Slic3r

Un dels programes més coneguts d'aquest tipus és l'anomenat *Slic3r*, el qual és un programa lliure i obert creat per l'arquitecte italià *Alessandro Ranellucci* [¹¹³] que s'utilitza per convertir un model de peça en 3D en instruccions de codi "G" per a sistemes d'impressió 3D per aportació mitjançant tecnologia de deposició de fil fos (de manera general "FDM", però també "FFF" – veure apartat A5.1).

El programa *Slic3r* talla el model en 3D contingut en un fitxer de format *.stl* o *.amf* en llesques horitzontals (capes), per a continuació generar trajectòries de capçal d'extrusió per omplir les llesques determinades. La seva gran aportació, però, va consistir en reduir la configuració de tall de llesques en només tres opcions: diàmetre del capçal d'extrusió, diàmetre dels filaments a utilitzar i temperatura; així com aconseguir el tall en llesques de manera molt més ràpida (tot i que el seu creador afirma que la velocitat mai va ser el seu objectiu principal) (Veure Figura A5.3-1).

Ara bé, el que sí que volia el seu creador era mantenir un codi net i estructurat que facilités la incorporació de noves funcionalitats sobre el que ell anomena "*un potent motor de llescar*". Per aquesta raó, *Slic3r* utilitza codi C++ per realitzar la transformació geomètrica incondicional, mentre que es manté la lògica d'alt nivell en un llenguatge flexible, com és el *Perl*.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

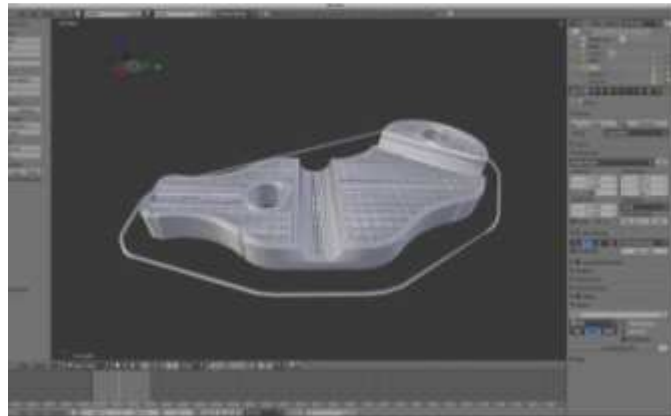


Figura A5.3-1. Captura de pantalla del programa Slic3r. Font: [¹¹³]

Algunes de les mencionades funcionalitats pràctiques que incorpora el programa són^[114]:

- i) Funcionalitats en les capes de material i en la decisió de com omplir o no diferents fragments de les peces a fabricar:
 - Detecció automàtica dels ponts i reducció de la quantitat de material de farciment necessari per formar correctament les formes en voladís: Slic3r detecta cada pont manera independent i només estén la distància estrictament necessària. La mateixa lògica s'aplica a les superfícies superiors, on el farcit sòlid s'estén només quan sigui necessari en lloc de tota la capa.
 - Opció de Microlayering (que havia estat dissenyada inicialment per Adrian Bowyer^[108]): Utilització d'alçades de capa diferents per al farciment i els perímetres de les peces: d'aquesta manera es pot fer, per exemple, els perímetres de gruix 0,1 mm, mantenint la impressió de farciment en un gruix de 0,3mm. S'estalvia temps i permet aconseguir una alta resolució sobre les superfícies.
 - Possibilitat d'assignar diferents altures de capa a diferents regions d'una sola impressió. Això permet estalviar temps fent servir grans alçades de capa per a les parts de les peces que no requereixin una gran definició, tot possibilitant l'ús de capes primes de material en aquells detalls de les peces que així ho necessitin. També permet, per exemple, introduir una primera capa més gruixuda per facilitar l'adhesió al llit d'impressió. Aquesta característica requereix una gran refactorització de la base de codi de manera que cap algorisme es basa en la suposició que totes les capes tenen el mateix gruix.
 - Configuració de diferents amplex d'extrusió per a cada part d'impressió (perímetres, farciment, suport, primera capa, etc.).
 - Ubicació de farcit només quan sigui necessari: detecta quines parts superiors de l'objecte requereixen realment de farciment per suportar el sostre. Per exemple, per fer una cúpula exterior només cal recolzar una columna a la part central; amb el consegüent estalvi de temps i material.
 - Possibilitat d'especificar un nombre diferent de capes superior i inferior . Això permet , per exemple, per fer gerros d'objectes sòlids

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

- ii) Funcionalitats per aconseguir peces de millor qualitat:
- Lògica de refredament que controla tant el ventilador de refrigeració com la velocitat d'impressió.
 - Impressió seqüencial: permet als usuaris omplir el llit d'impressió amb moltes peces però que aquestes s'imprimeixin una darrera l'altra (i no tots alhora capa a capa), de forma que es pot detectar si el model inicial té algun error un cop s'ha acabat d'imprimir la primera de les peces dins la plataforma.
 - Opció per no creuar perímetres: només fa creuar els objectes quan és estrictament necessari i, si cal, tracta de creuar pels vèrtexs en lloc de per les cares planes, tot fent possibles impressions molt més netes. Aquesta aplicació de Slic3r es basa en grafs de visibilitat i una cerca segons l'algoritme de Dijkstra ponderat.
 - Control d'acceleració en els diferents eixos: Slic3r permet afinar el firmware mitjançant l'assignació de diferents límits d'acceleració per a cada detall de la impressió (perímetres, farcit, ponts, etc.).
 - Funció Brim per millorar l'adherència i evitar que les peces es deformin mentre són fabricades capa a capa (Veure Figura A5.3-6).



Figura A5.3-2. Peça impresa amb tecnologia FDM incorporant un suport de tipus “brim” a tota la superfície en contacte amb la plataforma de construcció gràcies al programa Slic3r. Font: ^[13]

- iii) Funcionalitats per a una millor usabilitat del programa:
- Exposició en tot moment d'una interfície de línia d'ordres completa: Totes les opcions estan disponibles a la línia d'ordres, de manera que es poden integrar fàcilment amb altres programes dedicats a realitzar interfícies gràfiques boniques, visualització 3D, vista prèvia del G-code o fins i tot control d'impressió.
 - Us d'extrusors múltiples mitjançant arxius nadius (en lloc de tallar cada material com un objecte separat i utilitzar arxius de codi G per separat). Permet l'ús d'una extrusora secundària per al material de suport, obrint el camí per al suport soluble .

El cas *Slic3r* és paradigmàtic doncs no respon a cap iniciativa de mercat, sinó a l'interès d'un professional que necessitava imprimir maquetes en 3D a un cost raonable. D'aquesta manera, A. *Ranellucci* (Veure Figura A5.3-3) va iniciar el seu projecte l'any 2011 a partir de zero, no fent servir codi font ni algorismes de cap altre programa anterior. I en canvi, va ser capaç de materialitzar una aplicació ràpida i fàcil d'utilitzar per generar trajectòries complicades amb molt de detall.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Tot i això, lluny de voler mantenir la seva obra com a una eina d'autoconsum, o de voler explotar-la comercialment, el seu creador va decidir oferir-la de manera lliure i oberta per Internet i deixar que la comunitat pugues contribuir-hi i fer-la avançar sense cap interès lucratiu de cap persona ni de cap entitat.

D'aquesta manera, és la comunitat qui, a base d'utilitzar el programa per generar moltes i moltes línies de codi amb trajectòries per fabricar peces amb impressores 3D, posa de manifest les mancances de l'eina i proposa noves funcionalitats per al programa. El programa, doncs, està en constant revisió pel propi *Alessandro* i pels altres col·laboradors del projecte. Les noves característiques i correccions d'errors són llançades regularment. D'aquesta manera, la llegibilitat i mantenibilitat del codi són alguns dels objectius de disseny, que s'han mantingut al llarg dels més de 50 llançaments produïts en menys de dos anys.

Això ha fet que es posés en marxa un treball seriós sobre aquest programari per mantenir-lo al dia i posar en pràctica totes les característiques necessàries per obtenir una experiència d'impressió impecable i d'alta qualitat per a tots. Tant és així que a les darreres versions de 2013 *Slic3r* s'inclou amb els paquets de programari d'ordinador més importants: *Pronterface*, *Repetier-Host*, *ReplicatorG* i ha estat recolzat o bé directament finançat per gairebé totes les principals empreses d'impressió 3D en el món. En efecte, aquestes empreses prefereixen utilitzar el programa *Slic3r* (i en alguns casos, fins i tot finançar els seus creadors) abans que dedicar esforços en obtenir un programari propietari que, molt probablement, no aconseguiria tenir la qualitat ni el nivell de funcionalitat que ha aconseguit tota la comunitat de creadors que hi ha treballat desinteressadament.



Figura A5.3-3. A. *Ranellucci* presentant *Slic3r* a la presentació oficial de l'impressora *BCN3D+* a Barcelona el 18/11/2013. Font: Fundació CIM.

Bibliografia i fonts consultades

[¹] **VIVANCOS, J.**; Control Numèric I: Conceptes, Característiques i elements bàsics. Edicions UPC, (1996).

[²] **WINSTON, P.H.**; Inteligencia Artificial. Massachusetts Institute of Technology. Addison-Wesley Iberoamericana, Tercera Edición. Wilmington, DL (1994).

[³] **GOMÀ, J.R., VIVANCOS, J.**; *Construction by a Robot of a Logical Theory of Itself and its environment through Experiments*. Centre CIM (ICT-UPC), Barcelona, SPAIN, Dept. Eng. Mecànica, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, SPAIN. Emerging Technologies and Factory Automation, 1999. Proceedings. ETFA '99. 1999 7th IEEE International Conference on Volume: 1, On page(s): 535-543 vol.1.

[⁴] **KIDD, P.T.**; *Agile Manufacturing: A Strategy for the 21st Century*, IEEE Colloquium on Agile Manufacturing. Coventry, U.K. (Octubre de 1995).

[⁵] **IACOCCA INSTITUTE**; *21st Century Manufacturing Enterprise Strategy. An Industry-Led view. Volume 1&2*, Iacocca Institute at Lehigh University, Bethlehem, PA (1991).

[⁶] **GOULD, P.**; *What is Agility?* Manufacturing Engineer IEEE- Next Generation Manufacturing Enterprise (Febrer de 1997).

[⁷] **NELSON, A., HARVEY, F.A.**; *Technologies for Training and Supporting Your Agile Workforce, Creating the Agile Organization: Models, Metrics and Pilot*. Proceedings 4th Agility Forum Annual Conference. Agility Forum, Bethlehem, PA (1995).

[⁸] **DOVE, R.**; *The Meaning of Life and the Meaning of Agile*. Production Magazine, (Novembre de 1994).

[⁹] **NAYLOR, J.B. et al.**; *Leagility: Integrating the Lean and Agile Manufacturing paradigms in the total supply chain*. International Journal on Production Economics 62, (1999) 107-118 formerly (1997) Occasional Paper #47, Department of Maritime Studies & International Transport, Cardiff University

[¹⁰] **NAIM, M.M., GOSLING, J.**; *On leanness, agility and leagile supply chains*. International Journal on Production Economics 131, (2011) 342-354.

[¹¹] **INMANN R.A. et al.**; *Agile manufacturing: Relation to JIT, operational performance and firm performance*. Journal of Operations Management 29 (2011) 343-355.

[¹²] **SARKIS, J.**; *Benchmarking for agility*. Benchmarking: An international Journal 8 (2), 88-107. (2001)

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

[¹³] **PAN, F., NAGI, R.;** *Multi-echelon supply chain network design in agile manufacturing*. Department of Industrial and Systems Engineering, University of Buffalo (SUNY), NY. Omega 41 (2013) 969-983. Elsevier Ltd.

[¹⁴] **ZANDI, F., TAVANA, M.;** *A fuzzy logic group quality function deployment model for e-CRM framework assessment in agile manufacturing*. Computers & Industrial Engineering 61 (2011) 1-19. Elsevier Ltd.

[¹⁵] **VÁZQUEZ-BUSTELO, D., AVELLA, L.;** *Agile manufacturing: Industrial cas studies in Spain*. Technovation 26 (2006) 1147-1161. Elsevier Science Direct, Elsevier Ltd.

[¹⁶] **ZHANG, D.Z.;** *Towards theory building in agile manufacturing strategies – Case Studies of an agility taxonomy*. International Journal of Production Economics 131 (2011) 303-312. Elsevier B.V.

[¹⁷] **ELMOSELHY, S.A.M.;** *Hybrid lean-agile manufacturing system technical facet, in automotive sector*. Journal of Manufacturing Systems 32 (2013) 598-619. The society of Manufacturing Engineers. Elsevier Ltd.

[¹⁸] **KIDD, P.T.;** *Agile Manufacturing: Forging new Frontiers*. Addison-Wesley Pearson Education; 1st edition, U.K. (Setembre de 1994).

[¹⁹] **CHRISTOPHER, M.;** *The Agile Supply Chain: Competing in Global Markets*. Industrial Marketing Management num.29, pag 37-44. Elsevier Sience Inc., NY (2000).

[²⁰] **AVELLA, L., VÁZQUEZ-BUSTELO, D.;** *¿Es la Fabricación ágil un nuevo modelo de producción?* Universia Business Review – Actualidad Económica (Segon Trimestre de 2005)

[²¹] **MORIEN, R.;** *Agile Management and the Toyota Way for Software Project Management*. Centre for Extended Enterprise and Business Intelligence, Curtin University of Technology, Perth, Australia. Publicat en la 3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2005).

[²²] **KUSIAK, A., HE D.W.;** *Design for agile assembly: an operational perspective*. INT. J. PROD. RES., Vol. 35, No. 1, Pag.157-178 (1997).

[²³] **WOOLDRIDGE, M.J.;** *Intelligent Agents*; Cap. 1 del llibre *Multi-Agent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*; [G. Weiss \(ed.\), MIT Press, ISBN 0262731312, 1999.](#)

[²⁴] **WOOLDRIDGE. M.J., JENNINGS, N.R.;** *Intelligent Agents: Theory and Practice*. The knowledge Engineering Review, 10(2):115-152, (1995).

[²⁵] **ANGULO, J.M., DEL MORAL, A.;** *Guía fácil de la Inteligencia Artificial*. Ed. Paraninfo, Madrid SPAIN (1986).

[²⁶] **McCARTHY, J.;** *What is Artificial Intelligence?* Computer Science Department. Stanford University. Standford, CA (Novembre de 2004). Versió en-línea disponible a: <http://www.lsi.upc.es/~bejar/ia/ia.html> [Últim accés: 16/07/2007]

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

[²⁷] **TURING A.**; *Computing Machinery and Intelligence*. Mind, (1950).

[²⁸] **JUNG M. et al.**; *Architectural requirements for Rapid Development of Agile Manufacturing Systems*. Department of Industrial Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang, KOREA (1995). PERGAMON, Computers Industrial Engineering. Elsevier Science Ltd.

[²⁹] **KAMRANI A.K. et al.**; *An Intelligent Knowledge-Based System for Robotic Cell Design*. Industrial & Manufacturing Systems Eng. and Manufacturing Eng. Dpt.at University of Michigan and Computer Science. MI. Dept. at Lawrence Technological University. Computers Industrial Engineering vol 29 No. 1-4, pp 141-195 (1995).

[³⁰] **AUBERT J.P., SCHOMBERG, R.**; *Inteligencia Artificial*. Ed. Paraninfo, Madrid SPAIN (1986).

[³¹] **CHAN, F.T.S. et al.**; *The development of intelligent decision support tools to aid the design of flexible manufacturing systems*. Dept. of Industrial And Manufacturing Systems Engineering at the University of Hong Kong (China) and Leicester University Management Centre at University of Leicester (U.K.) Int. J. Production Economics 65 (2000) 73-84.

[³²] **VON ALTROCK, C.**; *Fuzzy Logic and Neurofuzzy Applications Explained*. Prentice-Hall PTR, NJ. (1995).

[³³] **ZADEH, L.A.**; *Fuzzy Sets*. University of California, Berkeley. CA. Information and Control, Vol 8 (1965) pp. 338-353.

[³⁴] **HILERA, J.R., MARTÍNEZ, V.J.**; *Redes Neuronales Artificiales:Fundamentos, Modelos y Aplicaciones*. RA-MA. Serie Paradigma, Madrid, ESPAÑA 1995.

[³⁵] **CHENG, K. et al.**; *Implementation of Agile Manufacturing – an AI and Internet Based Approach*. Dept. of Engineering, Glasgow Caledonian University, U.K. Elsevier, Journal of Materials Processing Technology 76 (1998) 96-101.

[³⁶] **RABEMANANTSOA, M., PIERRE, S.**; *An Artificial Intelligence approach for generating assembly sequences in CAD/CAM*. LICEF Laboratory, Université du Québec, CANADA. Artificial Intelligence in Engineering 10 (1996) 97-107.

[³⁷] **SILVA, M.**; *Las Redes de Petri: en la Automática y la Informática*. Editorial AC, Madrid, ESPAÑA, 1985.

[³⁸] **ZHA, X.F.**; *An object-oriented knowledge based Petri net approach to intelligent integration of design and assembly planning*. School of Mech. and Prod. Eng. SINGAPORE. Artificial Intelligence in Engineering 14 (2000) 83-112.

[³⁹] **YU, H. et al.**; *Combined Petri Net modelling and AI based heuristic hybrid search for Flexible Manufacturing Systems-part 1. Petri Net modelling and Heuristic search*. School of Informatics, Bradford University, UK, ISOCO, Spain, School of Eng. and Computer Science, Exeter University, UK and School of Eng., University of Sussex, UK. Computers and Industrial Eng. 44 (2003) 527-543.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

[⁴⁰] **YU, H. et al.**; *Combined Petri Net modelling and AI based heuristic hybrid search for Flexible Manufacturing Systems-part 2. Heuristic hybrid search.* School of Informatics, Bradford University, UK, ISOCO, Spain, School of Eng. and Computer Science, Exeter University, UK and School of Eng., University of Susexx, UK. *Computes and Industrial Eng.* 44 (2003) 545-56.

[⁴¹] **AZEVEDO, R.**; *Beyond intelligent tutoring systems: Using computers as meta-cognitive tools to enhance learning?* Dept. of Human Development, College of Education, University of Maryland, MD. *Instructional Science* 30:31-45 (2002).

[⁴²] **WEBER, E., CHRISTIAENS, W.**; *World Models and Inconsistencies.* Centre for Logic and Philosophy of Science, Universiteit Gent, BELGIUM. Kluwer Academic Publishers. *Foundations of Science* 3: 285-311 (1999).

[⁴³] **TANVIR, M., OKABE, Y.**; *Gradient Type Learning Rules for Neural Networks Base on Watcher-Environment Model.* Dept. of Electronic Engineering, University of Tokyo, JAPAN. *Neural Information Processing, 11th International Conference, ICONIP 2004, Calcutta, India, November 22-25, 2004, Springer 2004, ISBN 3-540-23931-6*

[⁴⁴] **LESPÉRANCE Y., LEVESQUE, H.J.**; *Indexical knowledge and robot action – a logical account.* Dept. of Computer Science, University of Toronto, Ontario, CANADA. ELSEVIER. *Artificial Intelligence* 73 (1995) 69-115.

[⁴⁵] **AGUIRRE, E., GONZÁLEZ, A.**; *A Fuzzy Perceptual Model for Ultrasound Sensors Applied to Intelligent Navigation of Mobile Robots.* Dept. of Computer Science and AI, University of Granada, SPAIN. Kluwer Academic Publishers. *Applied Intelligence* 19, 171-187, 2003.

[⁴⁶] **BALAKRISHNAN, S.**; *Intelligent Robotic Assembly.* Dept. of Mechanical and Industrial Engineering, University of Manitoba, CANADA. *Computers and Industrial Engineering* 38 (2000) 467-478.

[⁴⁷] **DENGYONG, Z., RUWEI, D.**; *The control structure of artificial creatures.* AI Lab, Institute of Automation, Chinese Academy of Science. CHINA. *Artif. Life Robotics* (2001) 5:133-136.

[⁴⁸] **GRANT, J. et al.**; *A logic-based model of intention formation and action for multi-agent subcontracting.* Dept. of Computer and Information Sciences and Dept. of Mathematics Towson University, MD and Institute for Advanced Computer Studies, University of Maryland, MD. ELSEVIER *Artificial Intelligence* 163 (2005) 163-201.

[⁴⁹] **HONG, M., SAYANDEH, S.**; *Novel Designs of a class of Robust and dexterous End-Effectors/Fixtures for Agile Assembly.* Experimental Robotics Laboratory. School of Engineering Science, Simon Fraser University, Burnaby, CANADA (1996).

[⁵⁰] **HONG, M., SAYANDEH S.**; *Design and Planning of a Novel Modular End-Effector for Agile Assembly.* Experimental Robotics Laboratory. School of Engineering Science, Simon Fraser University, Burnaby, CANADA. *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation.* Alburquerque, NM (Abril de 1997).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

[⁵¹] **RAMIREZ-SERRANO, A., BENHABIB, B.;** *Supervisory Control of Flexible-Manufacturing Workcells that Allow the Production of A priori Unplanned Part Types*. Computer Integrated Manufacturing Laboratory. University of Toronto, CANADA (2000).

[⁵²] **FUJII, S. et al.;** *A basic study on autonomous characterization of square Array machining cells for agile manufacturing*. Department of Computer and Systems Engineering. Kobe University JAPAN (2000) Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference.

[⁵³] **CHEN I-M.;** *Rapid response manufacturing through a rapid reconfigurable robotic workcell*. School of Mechanical and Production Engineering, Nanyang Technological University, SINGAPORE. PERGAMON. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 17 (2001) 199-213.

[⁵⁴] **Microdynamic Systems Laboratory, The Robotics Institute at Carnegie Mellon University.** Pàgina web: <http://www.msl.ri.cmu.edu/projects/minifactory> [últim accés: 24/07/2007]. Pittsburg, PA.

[⁵⁵] **WON KIM, T. et al.;** *A Fuzzy Logic Based Bin Picking Technique*. Dept. of Electronics Eng. Hanyang University, Seoul, COREA. IEEE. Proceedings of IECON'91 (1991).

[⁵⁶] **JACOBSON, L. and WECHSLER, H.;** *Invariant Image Representation: A path toward solving the Bin-Picking Problem*. Electrical Engineering Dept. University of Minnesota, MN. IEEE. CH2008-1/84/0000/0190 (1984).

[⁵⁷] **BACHLER G. et al.;** *A Vision Driven Automatic Assembly Unit*. Dept. Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology. CAIP'99, LNCS 1689, pp.375-382. © Springer-Verlag. Berlin, GERMANY (1999).

[⁵⁸] **BERGER M. et al.;** *Vision Guided Bin Picking and Mounting in a Flexible Assembly Cell*. Dept. Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology. IEA/AIE 2000, LNAI 1821, pp 109-117 © Springer-Verlag. Berlin, GERMANY (2000).

[⁵⁹] **QUINN, R.D. et al.;** *Design of an Agile Manufacturing Workcell for Light Mechanical Applications*. Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation. CWRU. Cleveland OH. (1996)

[⁶⁰] **CAUSEY, C.G. et al.;** *Design of a flexible Parts Feeding System*. CWRU. Cleveland OH. Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation. CAISR Tech Report#TR96-110 (1997).

[⁶¹] **CAUSEY, C.G. et al.;** *Testing and Analysis of a Flexible Feeding System*. CWRU. Cleveland OH. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. (1999).

[⁶²] **NEWMAN, W.S. et al.;** *Design Lessons for Building Agile Manufacturing Systems*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol 16. No. 3 (Juny de 2000).

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

[⁶³] **HOLLIS, R.L. et al.**; *Toward a Second-Generation minifactory for Precision Assembly*. The Robotics Institute at Carnegie Mellon University. Proc. Int'l Advanced Robotics Program, Moscow, RUSSIA (Abril de 2003).

[⁶⁴] **BROWN, H.B. et al.**; *A Precision Manipulator Module for Assembly in a Minifactory Environment*. The Robotics Institute at Carnegie Mellon University. Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '01), Maui, HAWAII (Novembre de 2001).

[⁶⁵] **LAUWERS, T.B. et al.**; *Free-Roaming Planar Motors: Toward Autonomous Precision Planar Mobile Robots*. The Robotics Institute at Carnegie Mellon University. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans, LA (Abril de 2004).

[⁶⁶] **LAUWERS, T.B. et al.**; *Progress in Agile Assembly: Minifactory Couriers based on Free-Roaming Planar Motors*. The Robotics Institute at Carnegie Mellon University. 4th International Workshop on Microfactories. Shanghai, CHINA (Octubre de 2004).

[⁶⁷] **UNGER, B.J. et al.**; *Teleoperation Mediate Through Magnetic Levitation: Recent Results*. The Robotics Institute at Carnegie Mellon. Mechatronics and Robotics '04. Aachen, GERMANY (Setembre de 2004).

[⁶⁸] **HOLLIS, R.L. et al.**; *Design and Development of a Tabletop Precision Assembly System*. The Robotics Institute at Carnegie Mellon University. Mechatronics and Robotics '04. Aachen, GERMANY (Setembre de 2004).

[⁶⁹] **RIZZI, A.A. et al.**; *Agile Assembly Architecture: An Agent Based Approach to Modular Precision Assembly Systems*. The Robotics Institute at Carnegie Mellon University. Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on robotics and Automation. Albuquerque, NM (Abril de 1997).

[⁷⁰] **GOWDY, J., RIZZI, A.A.**; *Programming in the Architecture for Agile Assembly*. The Robotics Institute at Carnegie Mellon University. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference in Robotics and Automation. Detroit, MI (Maig de 1999).

[⁷¹] **GOWDY, J., BUTLER, Z.J.**; *An Integrated Interface Tool for the Architecture for Agile Assembly*. The Robotics Institute at Carnegie Mellon University. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference in Robotics and Automation. Detroit, MI (Maig de 1999).

[⁷²] **RETHINK ROBOTICS**. Pàgina web oficial de la companyia: www.rethinkrobotics.com [últim accés: 23/09/2012].

[⁷³] **SHADOW ROBOT COMPANY**. Pàgina web oficial de la companyia: www.shadowrobot.com [últim accés: 22/09/2012].

[⁷⁴] **PAPACOSTAS, C.S., PREVEDOUROS, P.D.**; *Transportation Engineering & Planning*. ISBN 0-13-081419-9. Prentice-Hall. Upper Saddle River, New Jersey. Third Edition, 2001.

[⁷⁵] **BLUM, C., ROLI, A.**; *Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison*. ACM Computing Surveys, Vol. 35, No. 3, Setembre de 2003, 268-308.

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

[⁷⁶] **GLOVER, F.**; *Future paths for Integer Programming and Links to Artificial intelligence*. Computers & Operations Research 13, (1986) 533-549.

[⁷⁷] **BLUM, C. et al.**; *Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey*. Applied Soft Computing 11 (2011) 4135-4151

[⁷⁸] **CORNELL UNIVERSITY - CREATIVE MACHINES LAB.** Pàgina web del grup de recerca: <http://creativemachines.cornell.edu/> [últim accés: 22/03/2014].

[⁷⁹] **SCHMIDT, M.D., LIPSON, H.**; *Discovering a Domain Alphabet*. Computational Synthesis Laboratory, Cornell University, Ithaca, NY 14853, EUA. Accessible gratuïtament en línia a la Pàgina Web del grup: <http://creativemachines.cornell.edu/sites/default/files/t10fp473-schmidt.pdf> [últim accés: 22/03/2014].

[⁸⁰] **BÉJAR, J.**; *Inteligencia Artificial: Apuntes de Aprendizaje Automático*. Departament de Llenguatges i Sistemes Informàtics de la Universitat Politècnica de Catalunya. Edició de Setembre de 2005.

[⁸¹] **GILDEMEISTER.** *Información técnica sobre productos: DMU 50 eVo linear* | Mecanizado simultáneo en 5 ejes de alto acabado, con accionamiento lineal y ángulos de mecanizado de máx. -18 grados. Material accessible en línea: www.gildemeister.com/es [Darrer accés: 25/05/2007]

[⁸²] **HEIDENHAIN, J.** *TNC 426, TNC 430 Modo de Empleo en diálogo Heidenhain en texto claro. Versión en español 4/2001*. 340 135-52 F&W. 506 pàg. Heidenhain GmbH, Alemanya, 2001.

[⁸³] **ANDERSON, C.** *Makers: The New Industrial Revolution*. ISBN-13: 978-0307720955. Crown Business; Random House Inc. New York, USA, 2012.

[⁸⁴] **3DHubs: Local 3D Printing Services and 3D Printers.** Pàgina web oficial de l'empresa i botiga: www.3dhubs.com [últim accés: 12/05/2014].

[⁸⁵] **GITHUB.** Pàgina web oficial del repositori: <https://github.com/> [últim accés: 08/12/2013].

[⁸⁶] **PETROUTSOS, E.**; *La Biblia de Visual Basic 2008*; ISBN-13: 978-8441524736. Ed. Anaya Multimedia; 2009.

[⁸⁷] **GENDREAU, M., POTVIN, J.Y.**; *Metaheuristics in Combinatorial Optimization*. Annals of Operations Research 140, (2005) 189-213. Springer Science + Business Media Inc.

[⁸⁸] **Web Accessibility Initiative.** World Wide Web Consortium (W3C). Pàgina web oficial de la Iniciativa: <http://www.w3.org/WAI/> [últim accés: 08/02/2014].

[⁸⁹] **WOHLERS, T.T.**; *Wohlers Report 2006: An in-depth worldwide progress report on the rapid prototyping and manufacturing state of the industry*. ISBN 0-9754429-2-9. Wohlers Associates, Inc..

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

[⁹⁰] **MUNGUÍA, J., UCEDA, R., RODRÍGUEZ, J.V.** *Desarrollo de una herramienta de selección de procesos de fabricación basada en técnicas de Inteligencia artificial*. XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos AEIPRO. Badajoz, 8-10 Juliol 2009.

[⁹¹] **ARJONA J., MINGUELLA J., VIVANCOS, J.** *SelecoTool: Software tool for the search and comparison of cutting tools depending on standard, geometric and cutting properties and user's criteria*. 37th MATADOR International Conference. Manchester, 25-27 Juliol 2012.

[⁹²] **BARBA, E.** *Innovación: 100 consejos para inspirarla y gestionarla*. 2010, Libros de Cabecera. ISBN: 978-84-938303-3-5.

[⁹³] **FENOLLOSA, F.** *Lliçons d'Innovació i Desenvolupament Ràpid de Producte: "El Prototipat Ràpid de Producte"*. Ponència presentada al Col·legi d'Enginyers Tècnics Industrials de Barcelona el 16/10/2013.

[⁹⁴] **PINE, I., JOSEPH, B.;** *Mass customization: the new frontier in business competition*. Boston: Harvard Business School Press, 1993. Boston, MA.

[⁹⁵] **KELBASA, I.** *Digital Photonic Production – Opportunities and Challenges for the production of the Future*. Fraunhofer ILT. Ponència presentada al RMIT Europe (Barcelona) dins la sessió: New Frontiers in Additive Manufacturing el 07/03/2014.

[⁹⁶] **European Commission.** *Horizon2020 The EU Framework Programme for Research and Innovation. Participant portal*: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/societal-challenges> [últim accés: 24/02/2014].

[⁹⁷] **Ministerio de Economía y Competitividad. Gobierno de España.** *Plan Nacional de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2013-2016*. Accessible en línia a: http://www.idi.mineco.gob.es/stfls/MICINN/Investigacion/FICHEROS/Politicass_I+D+i/Plan_Estatal_Inves_cientifica_tecnica_innovacion.pdf [últim accés: 24/02/2014].

[⁹⁸] **GOMÀ AYATS, J.R., MINGUELLA-CANELA, J.** *Development of a methodology for the materialisation of ceramic rapid prototypes based on subtractive methods*. Archives of Material Science 2007; 28:9-14.

[⁹⁹] **Project MATCH: Monoblock Acetabular cup with Trabecular-like Coating.** Pàgina web oficial del projecte: <http://match-euproject.com/> [últim accés: 12/09/2013].

[¹⁰⁰] **VITALE-BROVARONE, C., MONTEALEGRE, M.A., MINGUELLA, J. ORLYGSSON, G., CAVALLERO, C., KORKUSUZ, F., KIRK, N.** *Monoblock Acetabular Cup with Trabecular-like Coating (MATCH)*. Publicat a: "From the design to the application of biomaterials". XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013). Book of Abstract, J. San Roman, J. A. De Pedro, B. Vazquez, L. Garcia (ESP), XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013), Madrid 8-12 de Setembre de 2013, pp. 1, 2013, ISBN: 9788469578315.

[¹⁰¹] **MINGUELLA, J., CUIÑAS, D., RODRÍGUEZ, J.V., VIVANCOS, J.** *Advanced Manufacturing of Ceramics for Biomedical Applications: Subjection Methods for Biocompatible Materials*. The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013. Procedia

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

Engineering. Volume 63, 2013, Pages 218–224. Accessible en línia a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.219>

[¹⁰²] **VITALE-BROVARONE, C., BAINO, F., VERNÉ, E., PERDIKA, P., KORKUSUZ, F., MINGUELLA, J.;** *Bioactive trabecular-like coatings to improve the osteointegration of ceramic prosthetic devices*. CORS 2013: 8th Combined meeting of Orthopaedic Research Societies. 13-16 Octubre de 2013. San Servolo, Venècia, Itàlia.

[¹⁰³] **MINGUELLA, J. CUIÑAS, D., MARTÍNEZ, M., UCEDA, R., VIVANCOS, J., BUJ, I.;** *Development of a tailored manufacturing route for the fabrication of advanced ceramic cups with biomedical applications*. Publicat a: "From the design to the application of biomaterials". XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013). Book of Abstract, J. San Roman, J. A. De Pedro, B. Vazquez, L. Garcia (ESP), XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013), Madrid 8-12 de Setembre de 2013, pp. 1, 2013, ISBN: 9788469578315.

[¹⁰⁴] **CUIÑAS, D., VITALE-BROVARONE, C., MINGUELLA, J., RODRIGUEZ, J.V., KORKUSUZ F.;** *Design for Deformation of Advanced Ceramic Cups for Acetabular Multilayer Prostheses*. Publicat a: "From the design to the application of biomaterials". XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013). Book of Abstract, J. San Roman, J. A. De Pedro, B. Vazquez, L. Garcia (ESP), XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013), Madrid 8-12 de Setembre de 2013, pp. 1, 2013, ISBN: 9788469578315.

[¹⁰⁵] **BAINO, F., MINGUELLA, J., VERNÉ, E., VITALE-BROVARONE, C.;** *Smart glass-derived coatings to improve the osteointegration of ceramic prosthetic devices*. Publicat a: "From the design to the application of biomaterials". XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013). Book of Abstract, J. San Roman, J. A. De Pedro, B. Vazquez, L. Garcia (ESP), XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013), Madrid 8-12 de Setembre de 2013, pp. 1, 2013, ISBN: 9788469578315.

[¹⁰⁶] **MONTEALEGRE, M.A., BAINO, F., ARIAS, J.L., MINGUELLA, J., VITALE-BROVARONE, C., MARSHALL, M.;** *Bioactive glass-ceramic coatings and structures on Al₂O₃-ZrO₂ composite substrates by laser cladding for orthopaedic applications*, Publicat a: *From the design to the application of biomaterials*. XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013). Book of Abstract, J. San Roman, J. A. De Pedro, B. Vazquez, L. Garcia (ESP), XXV Symposium of the European Society for Biomaterials (ESB 2013), Madrid 8-12 de Setembre de 2013, pp. 1, 2013, ISBN: 9788469578315.

[¹⁰⁷] **MONTEALEGRE, M.A., BAINO, F., ARIAS, J.L., MINGUELLA, J., VITALE-BROVARONE, C., MARSHALL, M.;** *Bioactive glass coatings on Al₂O₃-ZrO₂ composite substrates by laser cladding for orthopaedic applications*, In: *Proceedings of the 32th ICALEO Congress, ICALEO - 32th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Miami (FL), EUA. 6-8 d'Octubre de 2013*, pp. 7, 2013

[¹⁰⁸] **BOWYER, A.;** *Official Website*. Pàgina web oficial de la seva biografia: <http://adrianbowyer.net/> [últim accés: 06/12/2013].

[¹⁰⁹] **Diferents contribuïdors del projecte RepRap**. WikiMedia. Pàgina web oficial del projecte RepRap: http://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_Project [últim accés: 08/12/2013].

Programa de Doctorat d'Enginyeria Mecànica, Fluids i Aeronàutica

[¹¹⁰] **REPRAP PROFESSIONAL, LTD.** Pàgina web oficial de l'empresa i botiga: <http://www.reprappro.com/> [últim accés: 08/12/2013].

[¹¹¹] **FUNDACIÓ PRIVADA CENTRE CIM.** Pàgina web oficial de la Fundació sense ànim de lucre: <http://www.fundaciocim.cat/> [últim accés: 08/12/2013].

[¹¹²] **Projecte RepRapBCN.** Blog oficial del projecte: <http://www.reprapbcn.com/es/blog> [últim accés: 08/12/2013].

[¹¹³] **RANELLUCCI, A.** *Slic3r: G-code generator for 3D printers.* Pàgina web oficial del projecte: <http://slic3r.org/about> [últim accés: 25/10/2013].

[¹¹⁴] **RANELLUCCI, A.** *1.5 years of Slic3r development.* Blog oficial del projecte: <http://slic3r.org/blog> [últim accés: 25/10/2013].