

# Introducció

## La supervisió de processos basada en esdeveniments

Llançada a l'espai el 4 de desembre de 1996, la *Mars Pathfinder*<sup>1</sup> arriba a Mart el 4 de juliol de 1997, travessant directament la seva atmosfera fins impactar contra el sòl sota la protecció d'uns globus inflables. Després de rebotar diverses vegades, s'atura i reposa sobre sòl marcià. A continuació descarrega el vehicle *Soujourner*, amb l'objectiu de recollir informació per a la millor comprensió del planeta roig. El comandament es realitza per control remot des de la terra, a una velocitat de transmissió d'unes poques desenes de bits per segon. La *Pathfinder* envia des d'interessants imatges, que més de mig món ha pogut disfrutar a través d'Internet, fins a mesures meteorològiques de temperatura i pressió, passant per totes les dades de navegació del vehicle. En l'altre sentit, des de la Terra, s'envien totes les ordres que han de permetre seqüenciar les diverses tasques a realitzar per la *Pathfinder*: des de la conducció del *Soujourner*, fins a l'anàlisi fisico-química del sòl.

L'elevat cost de la missió (280 milions de dolars) obliga a plantejar-se com a objectiu operatiu primordial el mantenir sota control la *Pathfinder*: no només saber reconèixer en tot moment en quin estat es troba i conduir-la a la realització de les tasques planificades, sinó també preveure possibles malfuncions i saber recuperar-se de les diverses problemàtiques que puguin sorgir. Les circumstàncies de la missió fan que l'únic contacte amb la *Pathfinder* sigui per mitjà dels centenars de senyals que es transmeten a més de 190 milions de quilòmetres. És precisament l'anàlisi d'aquests senyals l'únic mitjà que permet tenir sota control a la *Pathfinder*. La tecnologia permet disposar d'aquests senyals, però això no és suficient; cal també el coneixement expert indispensable per a la correcta interpretació de la informació que contenen. Aquest coneixement es manifesta bàsicament en els enginyers de la NASA, dissenyadors i implementadors del sistema. De fet, molt d'aquest coneixement expert ha servit per crear programes informàtics pel control i la supervisió automatitzada de la missió.

---

<sup>1</sup>Tota la informació relativa a la missió *Pathfinder* ha estat extreta del CD-ROM *Mars Pathfinder Web Site*, processat pel *Jet Propulsion Laboratory*.

La fig. 1 mostra un exemple d'un senyal rebut durant la fase d'aterratge a Mart. L'enregistrament correspon a les dades d'un dels tres acceleròmetres de la *Pathfinder* durant la seqüència de rebots que va experimentar abans de reposar al sòl.

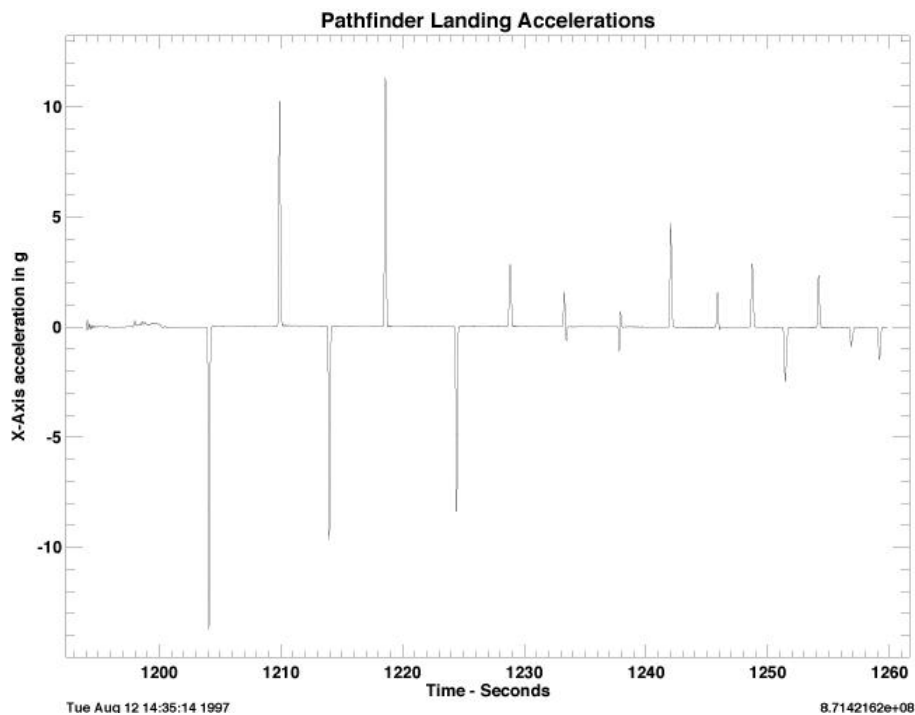


Figura 1: Dades d'acceleració durant l'aterratge de la *Mars Pathfinder*.

La figura mostra clarament els 15 primers rebots, tot i que posteriorment encara va estar rebotant durant més d'un minut fins aturar-se. A primer cop d'ull, aquestes dades sembla que aportin poca informació rellevant. No obstant, als ulls d'un expert, això no és així. De l'anàlisi d'aquest senyal és possible determinar aspectes com l'alçada màxima assolida entre rebots o els esforços als que l'estructura està sotmesa en els xocs contra la superfície. Per exemple, l'alçada màxima està relacionada amb l'interval de temps entre polsos: 6 segons equivalen a 16.7 metres mentre que 2 segons corresponen a 1.9 metres.

Imagini's per un moment que la NASA s'hagués interessat en implementar un mòdul informàtic capaç d'estimar en línia precisament aquesta alçada màxima entre rebots. S'hauria de programar un mòdul com l'esquematitzat en la fig. 2 que incorporés tot el coneixement expert sobre la dinàmica dels rebots.

Aquest mòdul s'integraria amb uns altres: de comunicacions, de control de velocitat, de seguiment de trajectòries, de planificació d'experiments

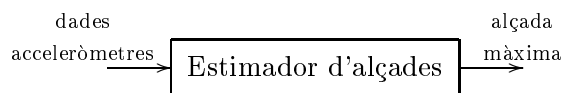


Figura 2: Mòdul estimador d'alçades

físico-químics, de govern del braç robot, de gestió de dades, etc. Tots ells constituïrien el programari del sistema de comandament i supervisió de la *Pathfinder*.

Molts d'aquests mòduls s'ha programat per treballar de forma mostrejada. Cada mòdul s'activa periòdicament, realitzant una sèrie de manipulacions o càlculs i proporcionant un resultat. Per exemple, pel control de velocitat, un algorisme de control PID proporciona periòdicament una acció de control a aplicar a les rodes motrius.

En aquest cas, és possible mantenir un ritme periòdic de funcionament. En altres casos no té perquè ser així. Per exemple, el mòdul estimador d'alçades només proporcionaria un resultat rellevant de forma esporàdica: cada vegada que es produís un pols. Seria un fet puntual i asíncron en el temps el que marcaria el ritme d'activació d'aquest mòdul.

En definitiva, mentre que un mòdul de control de velocitat treballa de forma mostrejada, el mòdul estimador d'alçades treballa en base a *esdeveniments* que es produeixen en el senyal de l'acceleròmetre. En aquest sentit, seria lògic considerar aquest mòdul com un sistema que processa seqüències d'esdeveniments i no pas dades mostrejades. Coneixent l'instant en que es produeixen els esdeveniments es podria determinar l'alçada màxima. Ara bé, llavors es faria necessari disposar d'algun mecanisme que detectés aquests esdeveniments. Al diposar de les dades mostrejades de l'acceleròmetre es podria dissenyar un altre mòdul que identificu els polsos en el senyal. En definitiva, el sistema estimador d'alçades s'estructuraria tal com es mostra en la fig. 3.

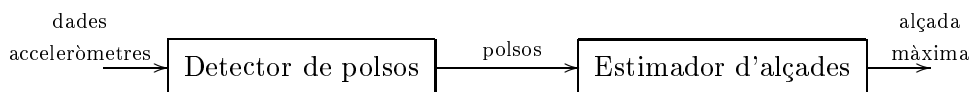


Figura 3: Detector de polsos i mòdul estimador d'alçades

Aquest exemple posa de manifest la rellevància d'aspectes com els següents:

- La necessitat d'un sistema de supervisió i control. L'elevat cost implicat en molts projectes comporta el disseny i la implementació d'una

arquitectura de supervisió i control fiable i robusta.

- Els senyals com a font d'informació. L'anàlisi dels múltiples senyals del procés pot aportar informació important pel desenvolupament de les tasques de supervisió i control.
- Els experts com a font de coneixement. Tot procés disposa d'un expert amb el coneixement necessari per saber interpretar la informació continguda en aquests senyals.
- La importància dels esdeveniments. Una part important del coneixement expert està lligat a l'observació d'esdeveniments en els senyals.

Aquestes consideracions no només es limiten a projectes de robòtica mòbil. En els processos productius corresponents a indústries com les químiques, papereres, siderúrgiques o cimenteres, els sistemes de control i supervisió tenen un paper destacat.

Fa uns anys que va nèixer el concepte de *Manufactura Integrada per Computador* (CIM, *Computer Integrated Manufacturing*)[25][96] com un model d'estructuració desitjable en la producció automatitzada d'una indústria. El model organitza totes les tasques de forma jerarquitzada en diversos nivells (veure la fig. 4). El nivell de sensors i actuadors és el més baix, servint d'interfície del sistema de producció amb el procés. Per damunt, els sistemes de control governen l'equipament del procés, regulant temperatures, pressions, velocitats, posicions, cabals, etc. A un nivell superior, el supervisor s'encarrega de vigilar l'estat del procés productiu, i si s'escau origina les accions correctores que siguin necessàries per mantenir-lo operatiu. Més amunt és possible considerar altres nivells amb tasques més orientades a la planificació i la gestió de la producció. Precisament, aquesta Tesi es centra en el nivell de supervisió.

Segons Kotch [62], un supervisor contempla dues tasques principals: vigilància i control supervisor. La vigilància del procés consisteix en l'adquisició i processat de dades amb la finalitat de tenir un coneixement actualitzat sobre l'estat de la planta. D'aquesta manera, s'ha de poder identificar si el procés està en un estat desitjat o no. Llavors, en cas que sigui necessari, el supervisor ha de ser capaç d'emprendre les accions oportunes que el conduixin a assolir l'estat desitjat. El control supervisor contempla precisament aquesta capacitat de reacció.

Normalment s'associa al supervisor la planificació de consignes, la selecció de modes d'operació, i la detecció i diagnosi de fallades, entre altres. Són tasques que usualment s'activen de forma esporàdica, a diferència de les del nivell de control, que ho fan de forma contínua o periòdica. La detecció d'una fallada posarà en marxa un procediment de diagnòstic i reconfiguració. La detecció d'una alarma iniciarà un procediment d'emergència. La finalització d'una reacció química provocarà una reprogramació de les consignes dels reguladors. En definitiva, l'aparició d'un o més esdeveniments

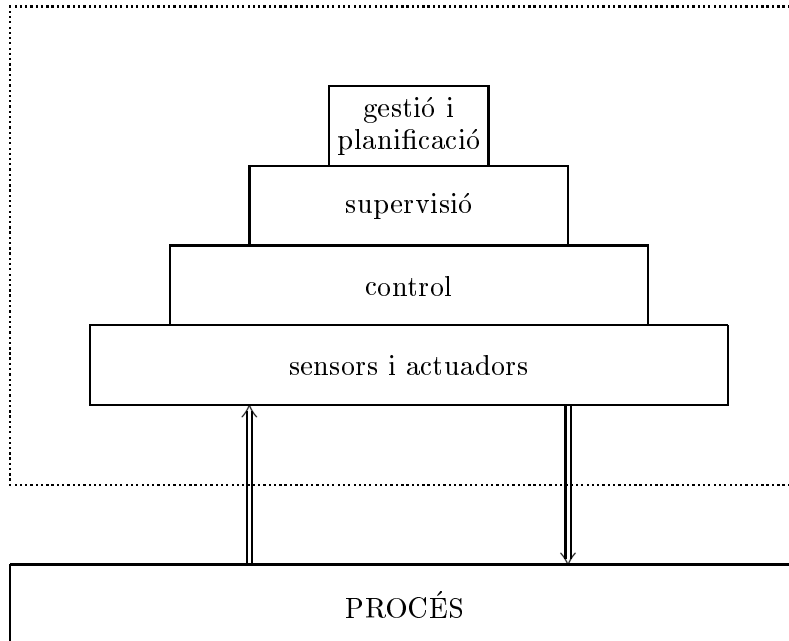


Figura 4: Piràmide CIM

desencadena un procediment de resposta. En aquest sentit el supervisor es comporta com un *sistema reactiu*[52].

Un esdeveniment és un fet puntual que apareix de forma imprevista. Els esdeveniments s'originen en el procés, però l'única forma de reconèixer-els és a partir dels senyals. El supervisor ha de saber explotar aquesta font d'informació en línia i extreure'n els esdeveniments significatius.

Però això no és suficient, ja que a continuació cal saber que fer amb aquests esdeveniments i processar-los adequadament. En aquesta tasca, l'expert del procés juga un paper molt important:

- sap interpretar els senyals,
- sap reconèixer esdeveniments,
- sap identificar els que són significatius i què volen dir,
- sap interpretar les seqüències d'esdeveniments que s'originen, i
- sap quines accions s'han de posar en marxa en conseqüència.

Per tant, el disseny d'un supervisor necessita del coneixement expert.

**Definició 0.0.1.** El *coneixement expert*  $\Xi$  és el coneixement heurístic que l'expert té sobre un determinat aspecte del procés. ♦

El coneixement heurístic és aquell que s'adquireix a partir de l'experiència pròpia[54]. Es fonamenta en un conjunt de simples relacions causals o regles que l'expert proporciona gràcies a la seva experiència pràctica, que ha adquirit mitjançant la observació del procés.

Per exemple, l'experiència ens diu que, any rere any, al setembre, es produeixen sobtadament aiguats en les rieres de diverses poblacions del Maresme. Això ha ocasionat més d'una vegada la pèrdua dels vehicles que alguns propietaris aparquen de forma inconscient en el llit de la riera. Si aquests propietaris disposessin d'aquest coneixement heurístic segur que no hi aparcarien el cotxe.

L'*expert* es refereix usualment a l'operador o l'enginyer de planta, que és qui posseix l'experiència d'haver treballat amb el procés d'una forma més perllongada.

Quan convingui es podrà concretar l'objecte de coneixement utilitzant la notació  $\Xi[\cdot]$ . Per exemple,  $\Xi[\mathcal{S}]$  indica el coneixement expert sobre un determinat senyal  $\mathcal{S}$ . En canvi,  $\Xi[\mathcal{P}]$  expressa el coneixement expert sobre el comportament del procés  $\mathcal{P}$ .

En definitiva, s'ha vist fins ara la importància d'uns sistemes que, donada la seva naturalesa, desenvolupen les tasques de supervisió en base al processament d'esdeveniments.

## Objectius de la Tesi

En l'apartat precedent s'ha vist la necessitat d'implementar un sistema al tercer nivell de la piràmide CIM (veure fig. 4). S'hauria de proposar una arquitectura vàlida per aquest sistema, que permetés desenvolupar les tasques de supervisió identificades per Kotch [62].

L'objectiu principal de la Tesi és desenvolupar una metodologia que permeti dissenyar un *Sistema Intel·ligent de Supervisió* (SIS) com el mostrat en la fig. 5. El SIS s'ubica precisament en el tercer nivell de la piràmide CIM.

Kotch enumera dues tasques pel supervisor. No obstant, per poder actuar en conseqüència, el control supervisor requereix el coneixement previ de l'estat del procés. Això fa que la capacitat de vigilància esdevingui imprescindible. La Tesi es centra en el desenvolupament d'un SIS vigilant, deixant el control supervisor com una possible línia d'investigació posterior. L'objectiu del *supervisor* és reconèixer en tot moment l'estat del *procés*, podent informar convenientment a l'operador de planta. Però, no té capacitat de prendre decisions. En aquest sentit, el SIS es pot considerar com un observador d'estat.

Per aconseguir-ho, el SIS obté informació actualitzada del procés mitjançant l'anàlisi dels *senyals mesurats*. A la fig. 5 es pot observar com la base de treball del SIS són els *esdeveniments*. S'ha vist en l'apartat precedent que una bona part del coneixement que té l'expert sobre un procés

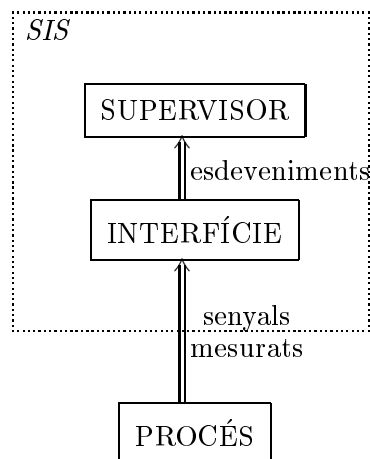


Figura 5: SIS – Sistema Intel·ligent de Supervisió.

està basat en l'observació de determinats esdeveniments significatius. La *interfície* del SIS és l'encarregada d'analitzar els senyals mesurats i detectar aquests esdeveniments significatius.

A continuació, el *supervisor* pot determinar l'estat del procés a partir del processament dels esdeveniments. El supervisor es concebrà com un *Sistema a Esdeveniments Discrets* (DES – Discrete Event System). Un DES (veure [33]) és un sistema d'estat discret governat per esdeveniments. És a dir, l'evolució de l'estat depèn totalment de l'aparició d'esdeveniments asíncrons en el temps. S'utilitzarà un model a esdeveniments discrets per identificar l'estat del procés.

Es poden establir diversos tipus de models per a un DES. El supervisor del SIS es constituirà a partir d'un model lògic (*i.e.*, només tindrà en compte el seqüenciament dels esdeveniments). No es consideraran altres aspectes com els intervals de temps entre esdeveniments o les probabilitats atribuïbles a les observacions d'esdeveniments. A l'apartat 1.3 es veurà una descripció més detallada dels DES.

Sovint, el coneixement que tenim sobre el procés a supervisar està afectat notablement per incertesa en les lleis que el regeixen i en les pertorbacions a les que pot estar sotmès. En aquestes situacions, és difícil, sinó impossible, disposar d'una descripció precisa en equacions diferencials. Per tant, és poc recomanable basar el disseny del SIS en aquest tipus de descripció. En canvi, existeix un altre tipus de coneixement aprofitable: el coneixement expert. Precisament el coneixement expert serà l'eina principal per dissenyar el SIS.

Tenint present l'arquitectura de la fig. 5, es pot interpretar globalment el SIS com un filtre d'informació, en el sentit que processa senyals mesurats amb l'objectiu d'abstreure informació sobre l'estat del procés. Primer, els se-

nyals s'analitzen mitjançant la interfície detectora d'esdeveniments. Aquest procés comporta un filtrat de tota la informació continguda en els senyals a fi d'obtenir certs esdeveniments significatius. No obstant, de la mateixa manera que el soroll acompanya inevitablement un senyal mesurat, entre els esdeveniments detectats n'hi hauran d'inesperats o no desitjats. A continuació, el model, que constitueix el supervisor, és capaç de processar els esdeveniments detectats, ignorant aquells que no interessa. Així, doncs, el supervisor és capaç de filtrar la informació aportada per la interfície del SIS i proporcionar una estimació sobre l'estat del procés.

En definitiva, l'objectiu principal de la Tesi s'assolirà en base a 3 objectius secundaris:

**Formalització del SIS.** Es proporcionaran les bases matemàtiques que permetran descriure formalment la *interfície* i el *supervisor* del SIS.

**Descripció d'una metodologia de disseny del SIS.** Es detallaran els procediments a seguir de cara a constituir la *interfície* i el *supervisor* del SIS per a un procés qualsevol.

**Validació del SIS mitjançant processos simulats i reals.** La metodologia de disseny s'il·lustrarà amb l'aplicació a diversos processos de prova reals. El SIS resultant s'implementarà en una plataforma informàtica per tal de poder validar la seva efectivitat.

A grans trets, la metodologia de disseny del SIS es pot dividir en dues direccions:

1. Explotar el coneixement expert per a seleccionar els esdeveniments significatius i dissenyar la interfície que permeti detectar-los. Aquesta fase s'assolirà aplicant la *metodologia de les finestres lliscants*.
2. Explotar el coneixement expert per obtenir un model a esdeveniments discrets que descriu els ordenaments esperats i els estats significatius. Aquesta fase es recolzarà en la teoria dels llenguatges i dels autòmats finits.

El SIS es dissenyarà i s'implementarà aprofitant la potència de l'entorn SIMULINK<sup>®</sup> de MATLAB<sup>®</sup>. SIMULINK<sup>®</sup> ofereix un entorn de simulació orientada a blocs que facilitarà la concepció del SIS.

## Organització de la Memòria

Aquesta Memòria s'organitza de la següent manera. El Capítol 1 té per objectiu posicionar el treball d'aquesta Tesi en el panorama científic. Primer es parla de les arquitectures i funcions de supervisió. A continuació es veuen diverses propostes de conversió de numèric a simbòlic, amb especial atenció



a la detecció d'esdeveniments. Finalment, es fa una introducció als DES, i als formalismes existents per a la seva representació i estudi.

En el Capítol 2 es formalitza una metodologia d'anàlisi de senyals per a la detecció d'esdeveniments significatius. Aquesta metodologia està basada en el paradigma de les finestres lliscants i s'organitza en dues fases. Primer es dissenya un *camí d'anàlisi* per a obtenir un senyal significatiu d'acord amb l'expert, tot seguit s'identifiquen els esdeveniments significatius. La metodologia s'il·lustra amb múltiples exemples que mostren la seva potència.

El Capítol 3 comença amb un repàs a la teoria dels llenguatges i dels autòmats. Després, es presenta una metodologia per obtenir una representació del procés segons un model a esdeveniments discrets. Aquesta metodologia es basa en la composició d'autòmats finits i s'acompanya d'un exemple de modelatge i supervisió d'un procés de dipòsits pulmó.

El Capítol 4 il·lustra l'aplicació de la metodologia de disseny d'un SIS per a dos processos reals: un procés biotecnològic de producció de llevat i una màquina eina. En cada cas, es fa una descripció del procés i de la problemàtica de supervisió a resoldre. A continuació, s'aplica la metodologia i es mostra la seva implementació en una plataforma informàtica. Un cop dissenyat, es demostra el bon funcionament del SIS amb diverses execucions utilitzant fitxers de dades dels processos reals.

Finalment, en el Capítol de conclusions es recullen les principals contribucions d'aquesta Tesi i s'apunten diverses propostes d'estudi i recerca futures.

La Memòria es complementa amb 4 apèndixs. L'Apèndix A recull el contingut del CD-ROM que acompanya aquesta Tesi i que conté divers programari i documentació en format electrònic. L'Apèndix B presenta altres resultats de supervisió pel procés biotecnològic que no s'han inclòs en l'apartat 4.2.2. L'Apèndix C mostra altres resultats de supervisió pel procés de mecanitzat que no s'han inclòs en l'apartat 4.3.2. Finalment, l'Apèndix D recull una breu introducció al formalisme visual dels Statecharts. Aquest apèndix està pensat per permetre la comprensió dels diagrames en STATEFLOW<sup>TM</sup> que apareixen al llarg de la Memòria.

