

# Capítol 1

## Supervisió de processos

L'objectiu d'aquest capítol és ubicar en el panorama científic dels darrers anys el treball desenvolupat en aquesta Tesi.

Primerament, es fa un repàs de les funcionalitats que s'esperen d'un supervisor i de les diverses metodologies que s'han desenvolupat per implementar-ho. Com es veurà, fonamentalment es deriven de la intel·ligència artificial.

A continuació es revisen diverses metodologies que han desenvolupat diferents grups de recerca per a proveir al sistema de supervisió d'una informació actualitzada, significativa i acurada del procés. Com es veurà, el supervisor necessita obtenir aquesta informació amb un cert grau d'abstracció, i fer-ho mitjançant esdeveniments resultarà una possible opció.

Finalment, s'exposa el concepte de sistema a esdeveniments discrets com a eina per interpretar els ordenaments observats d'esdeveniments i capaç de determinar l'estat del procés.

### 1.1 Arquitectures de supervisió

Tradicionalment, en la indústria de procés, els operadors s'han ubicat en el nivell jeràrquic més alt d'un sistema de control, assumint la responsabilitat d'identificar el seu estat de funcionament, i d'iniciar accions correctives sempre que el domini de validès del control sigui excedit o que una fallada impedeixi el seu correcte funcionament. L'objectiu principal d'un sistema de supervisió és l'assessorament d'aquests operadors en la seva presa de decisions[77]. Un supervisor no ha de substituir completament els operadors humans, sinó que ha de detectar anticipadament situacions anormals i explicar-les de forma que els operadors puguin prendre decisions correctes i eficients[68].

Depenent del tipus d'aplicació serà desitjable un determinat grau d'autonomia. L'autonomia medeix el nivell d'intervenció humana que és necessària per funcionar. Per exemple, en una indústria química els controladors proporcionen un primer nivell d'autonomia: s'encarreguen de garantir l'asso-

liment de les especificacions de regulació d'una forma automàtica. En un segon nivell, un supervisor pot elaborar diagnòstics sobre les causes d'una fallada. Llavors, pot ser desitjable la participació de l'operador per jutjar aquests diagnòstics i prendre les decisions oportunes.

Imagini's ara un sistema robotitzat al que se li ha encomanat una tasca de reparació d'una nau en ple espai. Donada la ubicació remota del sistema robotitzat respecte als tècnics humans, serà aconsellable que el supervisor sigui capaç de planificar aquesta reparació i emprendre-la amb la mínima intervenció humana. En aquest cas, el grau d'autonomia desitjat és major que no pas en la indústria química.

Es pot afirmar que el grau d'autonomia d'un sistema vindrà condicionat pel conjunt d'activitats que siguin assumides pel supervisor. En els darrers anys, nombrosos treballs s'han centrat al voltant de la supervisió de processos. Revisant part de la bibliografia existent[10][17][56], es fa palès el gran ventall d'activitats que pot contemplar un supervisor:

- l'ajust de consignes, de paràmetres del controlador i de les lleis de control,
- el seguiment o monitorització de l'estat del procés i de les prestacions del control,
- la predicció de situacions,
- la detecció i diagnosi de fallades,
- la proposta d'accions correctives a l'operador, amb la seva justificació corresponent,
- la planificació d'activitats seguint criteris d'optimització, i
- la coordinació d'accions.

Per desenvolupar totes aquestes tasques, s'han proposat diverses arquitectures de supervisió. Majoritàriament, totes elles tenen en comú una organització modular i jeràrquica[10][18][20][56][67][101] com la mostrada en la fig. 1.1, ubicant les funcions de supervisió per damunt del control.

En aquesta figura es fa palès l'estructuració interna del supervisor. Aquesta estructuració contempla tota la funcionalitat que s'acaba d'enumerar.

Cal tenir un coneixement actualitzat de l'estat del procés controlat. Convé saber en quin estat de funcionament està o si s'ha produït alguna fallada. Aquesta tasca es fonamenta principalment en el tractament dels senyals del procés  $Y$  i del controlador  $U$ . S'utilitzen múltiples termes per denominar aquesta activitat: observació, monitorització o seguiment de l'estat. En aquesta Tesi s'utilitzarà extensament el terme *vigilància*.

És convenient que l'estat del procés sigui comunicat a l'operador per al seu coneixement. No obstant, si s'escau, el supervisor haurà de prendre una



o amb xarxes neuronals. No obstant, el control intel·ligent cobreix moltes més metodologies. El fet és que avui en dia hi ha problemes de control que no es poden formular i estudiar utilitzant les metodologies de control convencional. Això és degut principalment a l'existència d'incertesa. Els components, els objectius de control, els models de la planta i les lleis de control no estan sempre completament definits, o bé perquè no es coneixien en la fase de disseny o bé perquè han canviat inesperadament. Llavors, es fa necessari utilitzar tècniques de presa de decisions a alt nivell que permetin raonar sota incertesa i emprendre les accions apropiades.

Per resoldre aquests problemes d'una manera sistemàtica, en els darrers anys s'han proposat un conjunt de mètodes col·lectivament coneguts amb el nom de control intel·ligent[16]. Aquests mètodes permeten al sistema de control adquirir un alt grau d'autonomia. La principal disciplina amb la que es fonamenten aquestes metodologies és, evidentment, la intel·ligència artificial (AI, *artificial intelligence*).

La AI es defineix com l'estudi de les facultats mentals a través de l'ús de models computacionals. Ha permès utilitzar coneixement i/o models heurístics d'una naturalesa més qualitativa o funcional que la proporcionada pels models purament matemàtics. La AI ha originat diverses tècniques com els sistemes basats en regles o coneixement, els sistemes evolucionistes, els sistemes qualitius, els sistemes connexionistes, els sistemes difusos o els sistemes de classificació. Arran d'aquestes metodologies hi ha hagut propostes per implementar supervisors basats en sistemes experts[45][78][80][99], en algorismes genètics[32], en raonaments qualitius[10][63][68][75][77], en xarxes neuronals[22][61], en lògica difusa[82] o en mètodes de classificació[102]. A [41], Colomer denomina *supervisió experta* a la supervisió que utilitza eines de la AI.

Els mètodes derivats de la AI poden ser utilitzats tant per observar l'estat com per prendre decisions (veure la fig. 1.1). No obstant, aquesta Tesi es centra únicament en el disseny de supervisors amb la capacitat de vigilància. Les propostes que existeixen per monitoritzar l'estat d'un procés amb incertesa es basen normalment en disposar d'algun tipus de model del procés[56]. S'acostumen a utilitzar descripcions tan diverses com una base de regles, una xarxa neuronal, un model qualitatiu o un sistema a esdeveniments discrets (veure la definició a l'apartat 1.3).

Aquesta darrera proposta d'emmagatzemar la intel·ligència del supervisor mitjançant un sistema governat per esdeveniments discrets[19][34][74], es fonamenta en el fet que permet modelar el procés amb un grau d'abstracció adequat a la seva incertesa. A [75] Lunze justifica la necessitat d'utilitzar una descripció més qualitativa o abstracta pel supervisor que no pas quantitativa. D'altra banda, a [10] Aguilar concep el supervisor qualitatiu com a manipulador de símbols, i un esdeveniment efectivament és una classe de símbol. Precisament, per desenvolupar el supervisor, en aquesta Tesi s'ha seguit la descripció de sistemes a esdeveniments discrets.

A [41], Colomer destaca, com una necessitat del supervisor, la traducció dels senyals numèrics que provenen del procés en dades qualitatives o símbols de forma que puguin ser manipulades per les tècniques de AI. En el cas d'aquesta Tesi interessarà poder detectar un tipus particular d'informació simbòlica: els esdeveniments. En el següent apartat, s'investiguen diverses propostes per implementar aquesta interfície quantitativa–qualitativa.

## 1.2 Tècniques d'abstracció d'informació

S'entén com a tècnica d'abstracció d'informació aquella que permet obtenir la informació simbòlica requerida pel supervisor a partir dels senyals mesurats del procés controlat,  $U$  i  $Y$  (veure la fig. 1.1). Aquesta tècnica haurà de proporcionar informació significativa, en el sentit que haurà d'ésser utilitzable pel supervisor.

Arran de l'interès que hi ha en que aquestes tècniques puguin implementar-se en un sistema digital, només es consideraran senyals mesurats mostrejats. Es poden trobar dues tipologies de senyals mostrejats. D'una banda, hi ha els que tenen una magnitud quantitativa. Per exemple, el senyal mostrejat provinent d'un termoparell o d'un pH-ímetre. Per aquests senyals, les tècniques d'abstracció d'informació han de permetre obtenir una informació qualitativa (*i.e.*, els símbols) a partir d'una quantitativa (*i.e.*, la magnitud del senyal mesurat). En aquest context es parla de la necessitat d'implementar una interfície quantitativa–qualitativa.

D'altra banda, hi ha els senyals mesurats que tenen una magnitud qualitativa. Per exemple, un senyal binari que proporciona l'estat d'una vàlvula tot-o-res (*i.e.*, oberta o tancada). Aquests senyals ja proporcionen directament una informació simbòlica. No obstant, pot ser que aquesta informació no sigui prou significativa. En aquest cas, és necessari disposar d'unes tècniques d'abstracció d'informació que permetin obtenir la informació qualitativa cercada a partir de la disponible. En aquest altre context es parla de la necessitat d'implementar una transformació qualitativa, o bé una interfície qualitativa–qualitativa.

En l'apartat precedent s'han exposat diverses tècniques per manipular informació qualitativa. Qualsevol d'elles pot servir per implementar no només un supervisor sinó també una interfície qualitativa–qualitativa. Per exemple, es poden fer servir una base de regles, mètodes de classificació, autòmats o el raonament qualitatiu.

Aquest apartat es centra en l'estudi de propostes existents encaminades a la implementació d'una interfície quantitativa–qualitativa. En els apartats 1.2.1, 1.2.2 i 1.2.3 es veuran tres orientacions derivades del raonament qualitatiu, de la lògica difusa i de l'anàlisi de forma del senyal, respectivament.

No obstant, l'interès principal d'aquesta Tesi és la caracterització del senyal mitjançant esdeveniments. Ja es veurà que s'interpretarà un esde-

veniment com un canvi del valor qualitatiu d'un senyal. En l'apartat 1.2.4 s'exposaran les diverses propostes que existeixen en aquest sentit.

### 1.2.1 Qualificació en intervals

La proposta més intuïtiva per qualificar la magnitud numèrica d'un senyal consisteix en establir una partició del seu rang. Per exemple, un llinar de  $300^{\circ}\text{C}$  aplicat sobre el senyal provinent d'un termoparell permet discriminar entre les magnituds qualitatives *NORMAL* (*i.e.*, per sota del llinar) i *SOBREESCALFAMENT* (*i.e.*, per damunt del llinar).

Aquest tipus de qualificació mitjançant intervals és seguit pel raonament qualitatiu[28][100]. El raonament qualitatiu permet el modelatge i la simulació de processos en base a la representació qualitativa de variables i de sistemes. Per exemple, la fig. 1.2 mostra una descripció qualitativa de variables proposada per De Kleer[44].

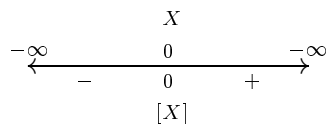


Figura 1.2: Qualificació de la variable  $X$  en signes  $[X] = \{-, 0, +\}$ .

Pel que fa als sistemes, aquests es solen descriure mitjançant equacions qualitatives[63], relacions causals qualitatives[77] o combinacions mixtes d'ambdues representacions[29].

La qualificació de variables no només és aplicable a un senyal, sinó també a les seves derivades successives. Llavors, les equacions qualitatives relacionen les variables i les seves derivades.

Per tant, la descripció qualitativa d'un senyal i de les seves derivades mitjançant intervals esdevé un possible mecanisme d'abstracció d'informació. Així mateix les equacions qualitatives poden utilitzar-se per generar nova informació qualitativa a partir de la transformació o manipulació de la informació qualitativa disponible.

Una altra formulació qualitativa alternativa és la proposada per Lunze[74]. Consisteix en la partició de l'espai d'estat per obtenir un conjunt de regions qualitatives multidimensionals i la descripció del sistema mitjançant un autòmat no determinista.

### 1.2.2 Qualificació en conjunts difusos

La teoria de la lògica difusa també es pot aplicar a la qualificació de senyals. En aquest cas, es tracta d'una qualificació difusa. La fig. 1.3 il·lustra la

qualificació de l'univers de discurs d'un senyal (*i.e.*, el conjunt de tots els valors possibles de la seva magnitud) en dos conjunts difusos.

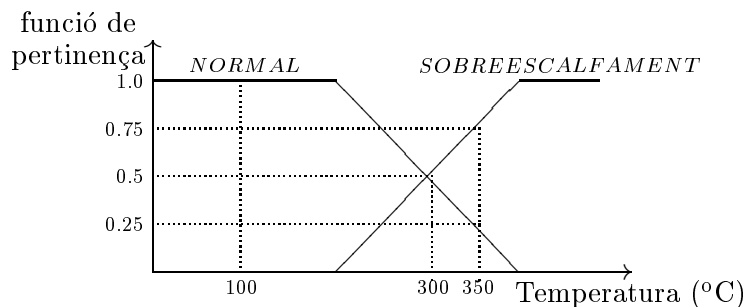


Figura 1.3: Qualificació de la temperatura  $X$  en els conjunts difusos *NORMAL* i *SOBREESCALFAMENT*.

La qualificació difusa permet associar a cada valor de la magnitud d'un senyal un o més conjunts difusos o símbols, amb un cert grau de pertinença a cadascun d'ells. Per exemple, una temperatura de  $350^{\circ}\text{C}$  es pot considerar una situació de sobreescalfament amb un grau de pertinença 0.75. Però a la vegada, es podria interpretar com una situació de normalitat amb un grau de pertinença 0.25. En canvi, una temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$  s'associa a una situació absolutament normal — amb un grau de pertinença 1.

La lògica difusa estableix unes regles per a realitzar operacions amb els conjunts difusos. Les operacions d'intersecció, unió i complement s'han adaptat de la teoria de conjunts clàssica. Altrament, les propietats d'associativitat, commutativitat i distributivitat continuen essent vàlides.

En la lògica difusa, la transformació d'informació difusa es fa mitjançant regles. Es poden establir bases de regles difuses i obtenir nova informació difusa a partir de la disponible. S'estableixen diversos mecanismes mitjançant els quals es pot determinar el grau de pertinença de la nova informació a partir dels graus de pertinença de les informacions originals.

Per tant, la qualificació difusa permet abstrure informació acompanyat d'un cert grau de pertinença. D'altra banda, les bases de regles permeten modelar la transformació d'informació difusa, i, per tant, també es poden utilitzar per abstrure informació.

La lògica difusa va ser introduïda per Zadeh a [110]. Una bona descripció està disponible a [4].

Un plantejament mixte alternatiu es fa a [98]. La teoria dels conjunts difusos s'aplica al raonament qualitatiu, desenvolupant un algorisme de simulació qualitativa difusa.

### 1.2.3 Qualificació en funció de la forma del senyal

La forma del senyal pot ser prou significativa pel supervisor. A [56] s'exposa la possibilitat de detectar fallades en el procés en funció del contingut freqüencial del senyal. Unes oscil·lacions anormals en un senyal d'intensitat del corrent poden ser indicatives d'un motor mal equilibrat o d'un coixinet en mal estat, per exemple.

Existeixen propostes d'abstracció d'informació relacionades amb la forma del senyal. Colomer, a [39], proposa la caracterització d'un senyal a partir de la seva tendència i oscil·lació qualitatives. La tendència l'obté qualificant la derivada del senyal filtrat i l'oscil·lació qualificant la diferència entre el senyal filtrat i l'original.

Stephanopoulos[36] va desenvolupar formalment una tècnica que permetia representar de forma compacta un senyal mitjançant descripcions triangulars de la seva tendència. S'associava una descripció triangular a cada interval temporal delimitat per dos instants consecutius en que hi havia una variació del signe de la primera o segona derivada del senyal. Una descripció triangular era la regió triangular delimitada per les rectes tangents als punts inicial i final de l'interval, i la recta que unia ambdós punts. La fig. 1.4 mostra les set components triangulars possibles.

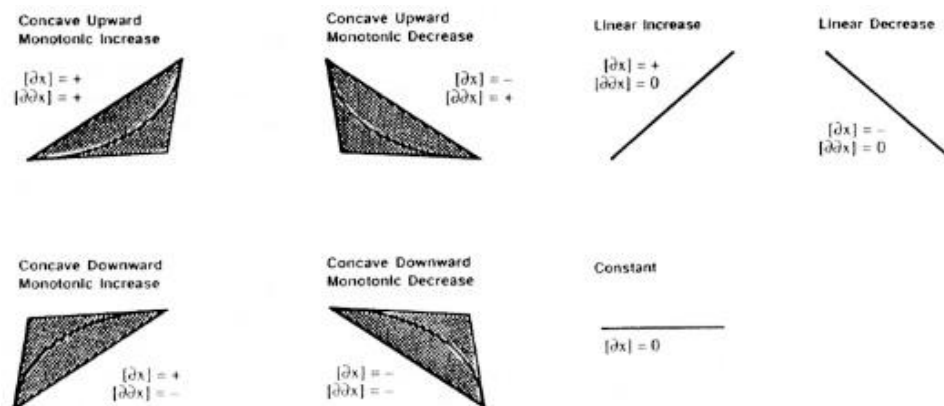


Figura 1.4: Descripcions triangulars de les tendències d'un senyal.

Amb posterioritat, s'han derivat altres caracteritzacions qualitatives de les tendències d'un senyal[40][41][57]. En totes elles, l'objectiu és detectar certes dinàmiques característiques del senyal (*i.e.*, les tendències) a partir de la identificació de seqüències de formes temporals bàsiques — molt sovint anomenades *episodis*. Per exemple, en el cas de Stephanopoulos una tendència consisteix en un encadenament específic de descripcions triangulars. D'aquesta manera, es pot obtenir una descripció qualitativa del senyal com a encadenament d'episodis.



A l'hora d'identificar les formes temporals bàsiques es poden aplicar des de simples mètodes de diferenciació finita molt susceptibles al soroll, fins a tècniques de reconeixement de patrons més robustes com les basades en xarxes neuronals[88].

Un altre enfocament consisteix en detectar en el senyal alguna forma temporal significativa aïllada. És el que s'acostuma a denominar *reconeixement de patrons en sèries temporals*. A diferència dels episodis, ara no es pretén obtenir una seqüència de formes temporals, sinó detectar en un moment donat quan el senyal segueix una determinada dinàmica característica. En aquest cas, són igualment vàlides les tècniques de reconeixement de patrons basades en xarxes neuronals i també les basades en el *Dynamic Time Warping*[26][58][59]. Aquest cas també es pot considerar com un mecanisme per obtenir una descripció qualitativa del senyal. Només cal considerar un possible estat qualitatiu per a cada forma temporal cercada més un estat qualitatiu associat a la *no detecció*. D'aquesta manera també es pot obtenir una seqüència d'estats qualitius com a descripció del senyal.

#### 1.2.4 Caracterització d'un senyal mitjançant esdeveniments

En els apartats precedents s'ha exposat diverses propostes per obtenir una descripció qualitativa del senyal com a una successió d'estats o valors qualitius. Usualment un esdeveniment s'associa al canvi en l'estat qualitatiu del senyal. Per exemple, pot ser interessant generar un esdeveniment quan una temperatura supera el llindar que separa els estats qualitius *NORMAL* i *SOBREESCALFAMENT*, anunciant una situació d'alarma. Un altre exemple pot ser l'esdeveniment associat a l'obertura (o tancament) d'una vàlvula tot-o-res. Es pot entendre que aquest es produeix quan la vàlvula passa de l'estat qualitatiu *TANCADA* a *OBERTA* (o a l'inrevés, respectivament). Per tant, resulta relativament simple obtenir esdeveniments significatius a partir dels mètodes d'abstracció que s'acaben de presentar en els apartats 1.2.1 o 1.2.3.

La fig. 1.5 il·lustra aquesta idea. El llindar  $ll$  serveix per qualificar la variable  $X$  en dos intervals. Així, la variable  $X$  qualificada,  $[X]$ , pot assolir dos estats qualitius anomenats  $q_1$  i  $q_2$ . Cada canvi d'estat qualitatiu es pot entendre com un esdeveniment:  $e_1$  significa que  $[X]$  ha passat de  $q_2$  a  $q_1$ , i  $e_2$  significa que  $[X]$  ha passat de  $q_1$  a  $q_2$ .

En aquest sentit, Antsaklis[65] proposa modelar un procés com un sistema a esdeveniments discrets mitjançant un autòmata estocàstic. La idea és particionar l'espai d'estat en regions, associant a cadascuna un estat de l'autòmat. En funció de l'evolució del procés i de l'estat qualitatiu de les entrades, pot ser que en determinats moments es creuin els límits que delimiten aquestes regions. En aquest moment es produeix un esdeveniment que s'associa a alguna transició que interconnecta els estats de l'autòmat.

Lunze, a [74], fa un plantejament alternatiu. Proposa també modelar

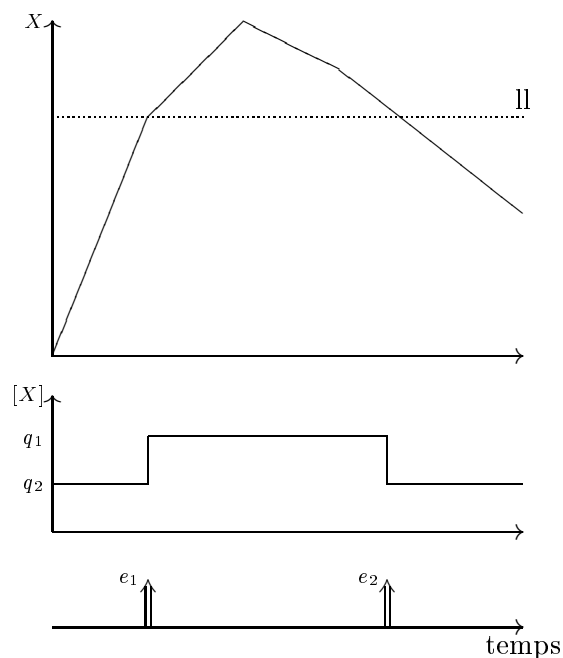


Figura 1.5: Esdeveniments generats al creuar un llindar que separa regions qualitatives.

un procés com un sistema a esdeveniments discrets mitjançant un autòmata estocàstic. Cadascun dels estats de l'autòmat també s'associa a una regió de l'espai d'estat particionat. No obstant, considera que el procés produeix esdeveniments periòdicament. Cada esdeveniment s'associa al valor qualitatiu de diverses variables d'entrada i sortida del procés en un moment donat. Tenint en compte l'estat actual del procés i l'esdeveniment observat, és possible determinar l'estat o estats destí amb una certa probabilitat d'encert associada a cadascun.

Quant a identificar esdeveniments a partir d'una quantificació en conjunts difusos (veure l'apartat 1.2.2) no és tan evident: un esdeveniment és un fet puntual i, per contra, el canvi d'un conjunt difús a un altre es produeix de forma gradual. Una possibilitat seria intentar derivar algun plantejament similar al de Lunze: treballar amb autòmats estocàstics i esdeveniments periòdics associats als graus de pertinença a un o varis conjunts difusos. En aquesta línia, Wee va introduir a [106] l'autòmat difús, caracteritzat per una funció de transició difusa.

A [68], Leyval exposa un enfocament particular. L'evolució temporal de les variables s'aproxima mitjançant segments rectilinis. S'associa un esdeveniment al pas d'un segment al següent, que es produeix quan hi ha un

canvi de pendent i/o d'amplitud instantani. El procés es modela mitjançant un graf causal, on els esdeveniments es propagen d'un node al següent mitjançant funcions de transferència qualitatives.

En aquesta Tesi s'utilitzarà el paradigma de les finestres lliscants per a generar una abstracció qualitativa del senyal. Aquesta metodologia es detallarà en el Capítol 2. De moment, només avancem que es basa en la qualificació mitjançant intervals de les dades obtingudes a partir de càlculs recursius aplicats sobre el senyal original. Un exemple podria ser qualificar la mitjana mòbil calculada sobre un conjunt acotat de dades consecutives. Un cop practicada la qualificació, els esdeveniments són generats de forma habitual, en cada canvi d'estat qualitatiu.

### 1.3 Sistemes a esdeveniments discrets

Un *Sistema a Esdeveniments Discrets* (DES, *Discrete Event System*) és un sistema d'estat discret governat per esdeveniments[33]. En el món de la informàtica i la programació aquests tipus de sistemes són coneguts amb el nom de *sistemes reactius*[52].

D'estat discret significa que l'espai d'estat és un conjunt discret. Per exemple, l'espai d'estat d'una màquina eina podria ser {LLIURE, OCUPADA, ATURADA, EN PANA}, identificant els modes de treball. En canvi, l'espai d'estat d'un buffer que emmagatzema peces en una cadena de muntatge podria ser {0, 1, 2, ...}. D'aquesta manera s'associaria l'estat del buffer al número de peces que emmagatzema en un moment donat.

D'altra banda, la propietat d'estar governat per esdeveniments significa que l'estat només pot canviar en determinats instants de temps, que es corresponen amb l'aconteixement d'esdeveniments discrets generats asíncronament. És a dir, l'evolució d'aquests sistemes no està lligada al simple pas del temps, sinó que depèn de l'aparició d'esdeveniments. Per exemple, la màquina eina d'abans assoleix l'estat EN PANA després de l'esdeveniment associat a l'aparició d'una fallada, o l'estat OCUPADA després de l'esdeveniment associat a l'arribada d'una peça a treballar.

La fig. 1.6 mostra un exemple de trajectòria d'estat típica d'aquests sistemes. La trajectòria d'estat mostra l'evolució de l'estat del sistema a mida que van apareixent els esdeveniments.

Observi's com els esdeveniments apareixen puntualment, de forma asíncrona en el temps. L'estat únicament varia quan apareixen certs esdeveniments. No obstant, convé destacar que no tota observació d'un esdeveniment implica un canvi d'estat, com passa amb l'esdeveniment  $e_3$ .

En contraposició als DES, els *Sistemes Dinàmics de Variable Contínua* (CVDS, *Continuous-Variable Dynamic System*) es caracteritzen per tenir un espai d'estat continu, i estar governats pel temps. Generalment, l'estat d'aquests sistemes varia a mida que el temps evoluciona. Un exemple de

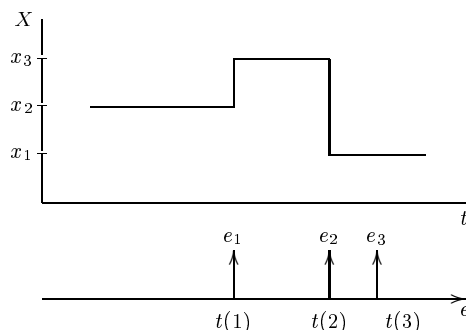


Figura 1.6: Trajectòria d'estat d'un sistema a esdeveniments discrets.

CVDS és un sistema constituït per una massa i una molla. Són sistemes en que l'estat es pot definir a partir de variables contínues, que admeten derivades. Per això normalment, els CVDS es modelen mitjançant equacions diferencials o de diferències, en cas de tractar-se de sistemes mostrejats.

El modelatge mitjançant aquest tipus d'equacions ja no és vàlida pels DES. Es fa necessari, per tant, desenvolupar nous paradigmes que permetin caracteritzar les seqüències d'esdeveniments al llarg del temps i la seva correspondència amb l'assoliment d'un determinat estat. S'admeten generalment tres tipus de models de DES: lògics, temporitzats i estocàstics.

Els models de DES *lògics* només es preocupen de caracteritzar seqüències d'esdeveniments, sense tenir en compte l'instant de temps en que han aparegut. Conegut l'estat inicial, els diferents estats del sistema s'assoleixen de forma determinista a partir de l'encadenament de distintes cadenes d'esdeveniments. Aquests models solen utilitzar-se en el cas de voler estudiar propietats qualitatives per a les quals la informació temporal és irrellevant. Per exemple, donat un estat inicial pot interessar estudiar quins estats són assolibles. En aquest cas, coneixent totes les seqüències d'esdeveniments possibles, cal verificar l'existència d'algun encadenament que condueixi a l'estat desitjat. En un altre circumstància pot interessar verificar si un cert conjunt d'esdeveniments s'encadenen d'acord amb unes especificacions prefixades. Per exemple, en un buffer d'alimentació de peces tipus FIFO per a una màquina eina, abans de servir la tercera peça que ha arribat cal servir la segona peça. Es troben aplicacions de models lògics en camps tan diversos com el de la validació de protocols de comunicacions[42], el del disseny de supervisors[86], el de la verificació d'exclusió mútua en la interacció de processos concurrents[49], o la detecció i la diagnosi de fallades[37][69][90].

A part del seqüenciamet, els models *temporitzats* tenen en compte l'instant d'aparició dels esdeveniments. Obviament, aquests models tindran interès en cas que es vulguin verificar certes propietats quantitatives

relacionades amb aspectes temporals. Per exemple, pot interessar predir el temps de permanència del sistema en un determinat estat, com d'aviat s'assolirà un estat en particular, o si una determinada seqüència d'esdeveniments es produirà abans d'un termini prefixat. Són especialment indicats per l'anàlisi de prestacions del sistema que modelen. Les aplicacions dels models temporitzats cobreixen diverses àrees com la verificació de protocols de comunicacions[71], el control supervisor[31], o la verificació de sistemes en temps real[70].

Els models temporitzats requereixen un coneixement a priori de tota la informació temporal necessària. Per exemple, cal saber exactament quan apareixeran certs esdeveniments en el futur. Evidentment, en moltes circumstàncies serà difícil disposar d'aquesta informació. En la pràctica, els sistemes sempre operen en ambients que estan constantment plagats d'incertesa. Per exemple, és imprevisible saber quan una màquina fallarà o quan es produirà una alarma. En aquestes circumstàncies és més adequat desenvolupar models probabilístics que caracteritzin estadísticament les incerteses. En aquest sentit apareixen els models de DES *estocàstics*. Aquests models s'han aplicat satisfactòriament a l'estudi de característiques qualitatives i quantitatives de sistemes de fabricació[66] i xarxes de comunicacions[43], i al modelatge, control i diagnosi qualitativa de processos[74][75][76].

En funció del tipus d'estudi que es vulgui fer, per una aplicació determinada serà més convenient utilitzar un model lògic, temporitzat o bé estocàstic. El model lògic és el més senzill de concebre i analitzar, però també és el que permet realitzar un estudi menys ambiciós. El temporitzat és el model més complert, no obstant és difícil d'obtenir en el sentit que requereix un coneixement molt precís sobre els esdeveniments del sistema. El model estocàstic és indicat en el cas que la informació sobre els esdeveniments sigui imprecisa, però també resulta complex de constituir. A més, un cop concebut un model temporitzat o estocàstic, la seva anàlisi pot resultar certament complexa. Sovint, el tractament analític és impossible i s'ha de recórrer a la simulació per afrontar una anàlisi quantitativa.

Per tots aquests tipus de models és usual expressar el comportament del sistema mitjançant llenguatges. Si els esdeveniments es consideren símbols d'un alfabet, el seu encadenament permetrà constituir paraules, i el conjunt de totes les paraules admissibles pel sistema constituirà el llenguatge. La formalització mitjançant llenguatges és atractiva per enunciar problemàtiques i discutir diverses propietats dels DES. No obstant, no resulta prou pràctica o manejable per afrontar tasques de verificació, disseny o anàlisi de prestacions. Per això, s'han proposat altres formalismes alternatius. Per exemple, els *autòmats*[55] o les *xarxes de Petri* (XdP)[81], permeten representar els llenguatges mitjançant estructures d'estats i transicions. Són estructures que permeten especificar tots els esdeveniments que són possibles en cada estat del sistema. A més aquestes representacions accepten diverses operacions de composició que faciliten la construcció d'un model DES a partir

dels models dels components.

En el cas dels models temporitzats s'utilitzen formalismes específics com els *autòmats temporitzats*[14][108], les *xarxes de Petri temporitzades*[64], el càlcul formal basat en la *lògica temporal*[84], la *max-plus àlgebra*[38] o el *DEVS* desenvolupat per Zeigler[73].

En el cas dels models estocàstics, apareixen els *autòmats temporitzats estocàstics*[48], les *cadenaes de Markov*[47] i la *teoria de cues*[60].

En aquest treball, s'ha optat per modelar el supervisor del SIS segons una descripció lògica. En aquesta elecció ha contribuït el fet que sigui el nivell descriptiu més elemental i manejable. Un cop avaluats els resultats que s'obtenen amb aquest tipus de model es podria estudiar la possibilitat d'utilitzar una descripció més completa del supervisor. No obstant, això s'emmarcaria dins d'una de les línies de treball futures proposades en el Capítol de conclusions.

D'altra banda, s'ha optat per expressar el supervisor a esdeveniments discrets mitjançant un autòmat, descartant l'opció de les XdP. Les XdP presenten tres avantatges principals respecte als autòmats[33]:

- És possible representar més llenguatges amb una XdP finita que amb un autòmat de estat finit.
- La representació de sistemes complexos a partir dels models dels components no suposa normalment un creixement exponencial.
- És un marc molt més natural per descriure la concurrència d'esdeveniments o processos.

No obstant això, les teories d'anàlisi i disseny desenvolupades pels autòmats són encara més adelantades que per les XdP. D'altra banda, les eines informàtiques de simulació, anàlisi i disseny estan més desenvolupades i són més potents pels autòmats que per les XdP. Per això, s'ha optat per aplicar els autòmats al disseny del supervisor a esdeveniments discrets.

El principal escull que presenta la representació mitjançant autòmats és el creixement exponencial que suposa l'operació de composició d'autòmats (veure la pàg. 109 dins l'apartat 3.2.2). Per això, existeixen propostes encaminades a tractar sistemes complexos, evitant la construcció d'un model de tal magnitud. Unes tècniques estan basades en el *control modular*[109], el *control descentralitzat*[24] o el *control jeràrquic*[107], proposant noves estructures o mecanismes de coordinació entre autòmats.

Unes altres propostes es basen en plantejar formes alternatives de representació que comportin una potència o riquesa expressiva superior. Un exemple en són els *Statecharts*. Els Statecharts constitueixen un formalisme visual desenvolupat per Harel[50][51][53], pensat per especificar i dissenyar DES complexos. Aquest formalisme extén els diagrames estat-transició convencionals permeten jerarquia d'estats i concurrència. Els nous diagrames

resulten altament estructurats, i comporten un gran estalvi tant en estats com en transicions, sense perdre claredat visual. Precisament, en aquesta Tesi, l'autòmat que modela el supervisor del SIS s'implementarà en Statecharts mitjançant STATEFLOW<sup>TM</sup>. A l'Apèndix D s'il·lustren algunes de les seves principals característiques a través d'un exemple.

El Capítol 3 presenta i il·lustra la metodologia de disseny del supervisor, basada en l'obtenció d'un autòmat com a model del procés.

