



Universitat de Girona

**REPRESENTACIÓ QUALITATIVA ASÍNCRONA
DE SENYALS PER A LA SUPERVISIÓ
DE SISTEMES DINÀMICS**

Joan COLOMER i LLINÀS

**ISBN: 84-8458-105-5
Dipòsit legal: GI-1217-2001**



Universitat de Girona

Departament d'Electrònica Informàtica i Automàtica

**REPRESENTACIÓ QUALITATIVA ASÍNCRONA DE
SENYALS PER A LA SUPERVISIÓ DE SISTEMES
DINÀMICS**

Memòria redactada per optar al grau de Doctor Enginyer Industrial,
per la Universitat de Girona, per

Joan Colomer Llinàs

Vist-i-plau
dels directors de la Tesi

Dr. Josep Lluís de la Rosa i Esteva
Titular d'Universitat
d'Enginyeria de Sistemes i Automàtica

Dr. Josep Aguilar Martín
Catedràtic d'Universitat
d'Enginyeria de Sistemes i Automàtica

Girona, juny de 1998



Universitat de Girona

Departament d'Electrònica Informàtica i Automàtica

**REPRESENTACIÓ QUALITATIVA ASÍNCRONA DE
SENYALS PER A LA SUPERVISIÓ DE SISTEMES
DINÀMICS**

Joan Colomer Llinàs

Directors :

**Dr. Josep Lluís de la Rosa i Esteva
Dr. Josep Aguilar Martín**

Girona, juny de 1998

*A la Carol
i als meus pares Angelina i Esteve.*

Agraïments

En primer lloc vull donar les gràcies a en Josep Lluís de la Rosa i en Josep Aguilar, els directors i supervisors d'aquest treball, per la seva experiència i suport en tot moment.

Vull també agrair especialment la col·laboració d'en Joaquim Meléndez, en Carles Pous, l'Antoni Ligeza i en Julio Waissman en el desenvolupament i l'aplicació de moltes de les idees presentades en aquest text.

Als Drs. Joseba Quevedo (de la Universitat Politècnica de Catalunya), Boutaib Dahhou (del LAAS-CNRS de Tolosa), Biel Fiol (de la Universitat de les Illes Balears), Núria Agell (de la Universitat Ramon Llull), Josep Vehí (de la Universitat de Girona), Monique Polit (de la Universitat de Perpinyà), Louise Travé-Massuyés (del LAAS-CNRS de Tolosa) i Neil Mort (de la University of Sheffield), els hi dono les gràcies per haver revisat els continguts d'aquest text i per la seva contribució a millorar-ne algunes parts.

També vull expressar el meu agraïment a B. Dahhou, J. B. Pourciel i la resta de membres de seu grup, per l'ajuda rebuda durant la meva estada al LAAS-CNRS de Tolosa, que va representar el començament dels treballs que aquí es presenten.

Finalment, haig d'agrair a tot el grup EXIT de la Universitat de Girona el seu recolzament incondicional, el temps i la paciència invertits, i, en especial, el bon ambient respirat durant tots aquests anys.

Contingut

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓ | 1 |
| 1.1 INTRODUCCIÓ GENERAL | 1 |
| 1.2 OBJECTIUS | 2 |
| 1.3 ORGANITZACIÓ | 3 |
| 2. SUPERVISIÓ EXPERTA | 5 |
| 2.1 INTRODUCCIÓ | 5 |
| 2.2 TASQUES DE SUPERVISIÓ: DEFINICIONS | 5 |
| 2.3 DETECCIÓ DE FALLADES..... | 7 |
| 2.3.1 Detecció de fallades basada en models analítics..... | 7 |
| 2.3.2 Detecció de fallades basada en senyals..... | 8 |
| 2.4 DETECCIÓ I DIAGNOSI DE FALLADES BASADES EN CONEIXEMENT..... | 8 |
| 2.5 SUPERVISIÓ EXPERTA. NECESSITAT D'INTEL·LIGÈNCIA ARTIFICIAL EN SUPERVISIÓ..... | 9 |
| 2.6 TRADUCCIÓ NUMÈRIC-SIMBÒLIC | 10 |
| 2.6.1 Modelització i simulació qualitatives..... | 11 |
| 2.6.2 Lògica Difusa | 14 |
| 2.6.3 Representació qualitativa d'informacions numèriques..... | 15 |
| 2.7 CONCLUSIONS..... | 21 |
| 3. LA REPRESENTACIÓ DELS SENYALS BASADA EN EPISODIS | 22 |
| 3.1 INTRODUCCIÓ, MOTIVACIONS..... | 22 |
| 3.1.1 Necessitat de raonament qualitatiu | 22 |
| 3.1.2 Necessitat de raonament temporal | 22 |
| 3.1.3 Necessitat de representar el coneixement d'una forma compacta | 23 |
| 3.1.4 Necessitat de representar el coneixement d'una forma natural..... | 23 |
| 3.1.5 Un exemple de motivació..... | 24 |
| 3.2 LA REPRESENTACIÓ DELS SENYALS EN EPISODIS..... | 26 |
| 3.3 FORMALITZACIÓ. REPRESENTACIÓ QUALITATIVA DE TENDÈNCIES | 26 |
| 3.3.1 Representació del temps | 26 |
| 3.3.2 Representació qualitativa..... | 27 |
| 3.4 REPRESENTACIONS TRIANGULAR I TRAPEZOÏDAL | 29 |
| 3.5 LENGUATGE DE DESCRIPCIÓ DE TENDÈNCIES (TDL) | 32 |
| 3.6 ANÀLISI QUALITATIVA DE PERFILS TEMPORALS | 33 |
| 3.7 REPRESENTACIÓ QUALITATIVA/QUANTITATIVA DE SENYALS | 35 |
| 3.8 CONCLUSIONS..... | 36 |
| 4. GENERALITZACIÓ DE LA REPRESENTACIÓ EN EPISODIS | 37 |
| 4.1 NECESSITAT I UTILITAT D'UNA GENERALITZACIÓ..... | 37 |
| 4.2 REPRESENTACIÓ DEL TEMPS I DEL SENYAL..... | 38 |
| 4.3 FUNCIÓ CARACTERÍSTICA..... | 38 |
| 4.4 INTERVALS CARACTERÍSTICS. ESTAT CARACTERÍSTIC. ESTAT QUALITATIU..... | 39 |
| 4.5 INSTANTS CARACTERÍSTICS..... | 41 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.6 | CARACTERÍSTIQUES FONAMENTALS I AUXILIARS | 41 |
| 4.7 | EPISODIS | 41 |
| 4.7.1 | Tipus d'episodis. Classificació fonamental i classificació útil | 42 |
| 4.8 | EXEMPLES | 43 |
| 4.8.1 | Representació triangular | 43 |
| 4.8.2 | Representació triangular | 43 |
| 4.8.3 | TDL | 45 |
| 4.8.4 | Representació trapezoïdal de Cheung i Stephanopoulos | 45 |
| 4.8.5 | Representació trapezoïdal d'Ayrolles | 46 |
| 4.8.6 | Anàlisi qualitativa de perfils temporals | 47 |
| 4.8.7 | Representació qualitativa/quantitativa de senyals | 47 |
| 4.9 | CONCLUSIONS | 48 |
| 5. | UNA NOVA REPRESENTACIÓ | 49 |
| 5.1 | INTRODUCCIÓ | 49 |
| 5.2 | FUNCIÓ CARACTERÍSTICA..... | 50 |
| 5.3 | INTERVALS CARACTERÍSTICS..... | 51 |
| 5.4 | INSTANTS CARACTERÍSTICS | 52 |
| 5.5 | CLASSIFICACIÓ FONAMENTAL | 52 |
| 5.6 | CARACTERÍSTIQUES AUXILIARS QUALITATIVES | 53 |
| 5.7 | CLASSIFICACIÓ ÚTIL | 53 |
| 5.8 | CARACTERÍSTIQUES AUXILIARS QUANTITATIVES | 56 |
| 5.9 | SEGMENTACIÓ DE L'ESPAI | 57 |
| 5.9.1 | Sistemes de primer ordre | 58 |
| 5.9.2 | Sistemes de segon ordre | 59 |
| 5.10 | COMPARATIVA AMB ALTRES REPRESENTACIONS | 62 |
| 5.11 | CONCLUSIONS | 64 |
| 6. | EXEMPLES D'ANÀLISI QUALITATIVA DE SENYALS | 65 |
| 6.1 | INTRODUCCIÓ | 65 |
| 6.2 | ANÀLISI DE RESPOSTES DE SISTEMES LINEALS A UN GRAÓ | 65 |
| 6.2.1 | Sistemes de primer ordre | 65 |
| 6.2.2 | Sistemes de segon ordre | 66 |
| 6.2.3 | Sistemes d'ordre superior..... | 67 |
| 6.2.4 | Sistemes de tipus 1 | 67 |
| 6.2.5 | Sistemes inestables | 68 |
| 6.3 | ANÀLISI DE TRAJECTÒRIES D'UN SISTEMA NO LINEAL | 70 |
| 6.3.1 | Model depredador - presa..... | 70 |
| 6.3.2 | Simulació..... | 72 |
| 6.3.3 | Resultats de la simulació | 74 |
| 6.3.4 | Representació i interpretació dels resultats..... | 76 |
| 6.4 | CONCLUSIONS | 82 |
| 7. | PROBLEMES DERIVATS DE L'APLICACIÓ A SENYALS REALS | 84 |
| 7.1 | INTRODUCCIÓ | 84 |
| 7.2 | FILTRATGE | 84 |
| 7.3 | ALTRES TÈCNiques | 86 |
| 7.4 | ESTIMACIÓ DE LA SEGONA DERIVADA | 89 |
| 7.5 | ESTIMACIÓ DEL SENYAL I DE LA PRIMERA DERIVADA | 91 |
| 7.6 | L'APROXIMACIÓ PER MÍNIMS QUADRATS COM A FILTRE FIR..... | 97 |
| 7.7 | EXEMPLE D'APLICACIÓ: DETECCIÓ I DIAGNOSI DE FALLADES EN UNA PLANTA DE LABORATORI | 101 |
| 7.7.1 | Detecció sense filtratge del soroll..... | 102 |
| 7.7.2 | Detecció amb filtratge del soroll..... | 105 |
| 7.8 | CONCLUSIONS | 106 |

| | |
|---|------------|
| 8. OBTENCIÓ EN LÍNIA DE LA REPRESENTACIÓ EN EPISODIS. | 108 |
| 8.1 MOTIVACIÓ. | 108 |
| 8.2 OBTENCIÓ I ACTUALITZACIÓ DE LA REPRESENTACIÓ. | 110 |
| 8.3 PROBLEMES PROPIS DE LA REPRESENTACIÓ EN LÍNIA. | 110 |
| 8.4 DETECCIÓ D'INSTANTS CARACTERÍSTICS I CLASSIFICACIÓ EN LÍNIA DELS EPISODIS. | 111 |
| 8.4.1 La qualificació i el raonament (classificació) en CEES. | 112 |
| 8.4.2 Preprocessament del senyal. | 113 |
| 8.4.3 Detecció d'instants característics. | 113 |
| 8.4.4 Memòria numèrica. | 115 |
| 8.4.5 Classificació. | 115 |
| 8.5 EXEMPLES DE REPRESENTACIÓ EN LÍNIA. | 118 |
| 8.5.1 Sistemes lineals. | 118 |
| 8.5.2 Sistemes no lineals. | 121 |
| 8.6 CONCLUSIONS. | 127 |
| | |
| 9. CONCLUSIONS I TREBALL FUTUR | 128 |
| 9.1 CONCLUSIONS GENERALS. | 128 |
| 9.2 TREBALL FUTUR. | 130 |
| 9.2.1 Diagnosi de fallades en circuits analògics (monoestable). | 131 |
| 9.2.2 Integració en un entorn de Supervisió. | 132 |
| | |
| 10. BIBLIOGRAFIA..... | 135 |

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Introducció general

La creixent demanda de qualitat, seguretat, disponibilitat i eficiència de costos en els processos industrials fa necessària la utilització de **Sistemes de Supervisió** en aquests processos. Aquests sistemes formen un nivell superior al dels sistemes de control i utilitzen tècniques i mètodes específics. La **Supervisió Experta** de processos utilitza mètodes i tècniques de la Intel·ligència Artificial (IA).

L'objectiu final de la Supervisió de processos és aconseguir sistemes tolerants a fallades, per això una part important de les tasques de Supervisió se centren en la Detecció i el diagnòstic de les diferents situacions de fallada que poden afectar els processos. Una altra part important és la presa de decisions per minimitzar l'efecte de les fallades sobre el funcionament del procés.

Totes aquestes tasques s'han de dur a terme utilitzant el coneixement que es té del procés (estructura, equacions estàtiques i dinàmiques, paràmetres, coneixement heurístic ...) i les dades que en provenen en forma de mesures. Aquestes dues fonts d'informació porten associades una sèrie de problemes que en dificulten la utilització. La incertesa, la imprecisió i la incompletesa, tant de les mesures com dels coneixements, fan que l'eficàcia i la fiabilitat dels sistemes de Supervisió sigui difícil d'aconseguir.

La utilització d'eines de la IA en el camp de la Supervisió de processos està motivada per aquestes necessitats. La IA és una disciplina molt extensa on un dels objectius és simular mecanismes de raonament on la incertesa, la imprecisió, la incompletesa o la presa de decisions poden ser adequadament representades i manipulades. Una de les característiques de la IA és la manipulació de símbols, més que de números. La informació que prové dels processos supervisats ho fa en forma de dades numèriques. Per això, la traducció de dades numèriques en símbols és una tasca important i necessària en la utilització de IA en Supervisió de processos. La Supervisió Experta de processos és la branca de la Supervisió que utilitza eines de la IA.

Al mateix temps, el fet que els processos supervisats siguin normalment sistemes dinàmics fa que el temps sigui una variable fonamental. En Supervisió de processos no és suficient tractar amb informació instantània del procés, sinó que és necessari manipular o raonar sobre el comportament històric dels senyals.

1.2 Objectius

L'objectiu general d'aquest treball és trobar i mostrar una eina que permeti obtenir una representació dels senyals procedents de sistemes dinàmics adequada a les necessitats dels sistemes de Supervisió Experta de processos. Aquest objectiu general es pot subdividir en diverses parts, que són tractades en els diferents capítols que componen el treball i que es poden resumir en els següents punts:

I. En primer lloc, cal conèixer les necessitats dels sistemes de Supervisió :

- La gran quantitat de dades que provenen dels processos fa necessari el tractament d'aquestes dades per obtenir-ne d'altres, més elaborades, amb un nivell més elevat de representació.
- La utilització de raonament qualitatiu, pròpia dels éssers humans, comporta la necessitat de representar simbòlicament els senyals, de traduir les dades numèriques en símbols.
- La Supervisió de sistemes dinàmics comporta que el temps sigui una variable fonamental, la asincronia dels esdeveniments significatius per a la Supervisió fa que les representacions més adequades i útils dels senyals siguin asíncrones.
- Finalment, l'ús dels coneixements experimentals en la Supervisió dels processos comporta que les representacions més naturals siguin les més útils.

II. Aquestes necessitats fan de la representació dels senyals mitjançant episodis l'eina amb més possibilitats per assolir els objectius que es volen assolir. Per això, es presenta un formalisme que permet descriure i incloure-hi la formalització i les diferents aproximacions a aquest tipus de representació ja existents i, al mateix temps, augmentar-ne la significació a través de característiques dels senyals que no es tenen en compte en les aproximacions ja existents.

III. El següent pas és aprofitar el nou formalisme per obtenir una nova representació amb un grau més gran de significació, cosa que s'aconsegueix representant explícitament les discontinuïtats i els períodes estacionaris o d'estabilitat, molt significatius en Supervisió de processos.

IV. Un problema sempre present en el tractament de senyals és el soroll que els afecta. Per aquest motiu es presenta un mètode que permet filtrar el soroll de manera que les representacions resultants quedin afectades el mínim possible per aquest tractament.

V. Finalment, es presenta l'aplicació en línia de les eines descrites. La representació en línia dels senyals comporta el tractament de la incertesa inherent al coneixement parcial del senyal (un episodi no pot ser determinat i caracteritzat completament fins que no s'acaba). L'obtenció de resultats amb determinats graus de certesa és perfectament coherent amb la seva utilització posterior mitjançant Sistemes Experts o altres eines de la IA.

Totes les aportacions del treball vénen acompanyades d'exemples i/o aplicacions que permeten observar-ne la utilitat i les limitacions.

1.3 Organització

Aquest treball està organitzat en nou capítols en els quals es desenvolupen els objectius descrits en la secció anterior. El primer capítol és únicament d'introducció. En els capítols segon i tercer es descriuen els principals antecedents relacionats amb les aportacions del treball. En els dos capítols següents s'estableixen les bases de l'aportació del treball i es mostren les eines desenvolupades. En el sisè capítol es mostren alguns exemples aplicació. A continuació, en dos capítols més, es descriuen els aspectes més relacionats amb la utilització d'aquestes eines. Finalment, l'últim capítol es dedica a les conclusions i a la proposta de treballs futurs.

En el *Capítol 2* s'introdueixen els principals conceptes que intervenen en la Detecció i Diagnosi de fallades i en la Supervisió de Processos. En aquest capítol també es justifica la necessitat d'utilitzar la IA en les tasques de Supervisió i, com a conseqüència, eines de traducció de números en símbols. Finalment, es descriuen diverses d'aquestes eines de traducció numèric-simbòlic.

El *Capítol 3*, com la resta de la tesi, està dedicat a una família d'aquestes eines: les representacions dels senyals basades en episodis. En aquest capítol es descriu la seva utilitat des de diferents punts de vista. També es presenta la formalització d'aquest tipus de representacions i les diverses aproximacions existents, posant de manifest les semblances i diferències entre elles i les mancances de cadascuna i de totes en general.

En el *Capítol 4* es presenta una de les principals aportacions de la tesi: una formalització més general de les representacions en episodis. Aquesta nova formalització, basada en la formalització ja existent, permet l'obtenció de representacions més ajustades a les diferents necessitats i als diferents tipus de senyals presents en la Supervisió de processos. En aquest capítol les aproximacions presentades en el capítol anterior es descriuen des del punt de vista de la nova formalització.

En el *Capítol 5* es descriu una nova aproximació basada en la formalització presentada en el capítol anterior. Aquesta nova aproximació és semblant a les altres, però, aprofitant les possibilitats que ofereix la nova formalització, té en compte alguns aspectes que permeten obtenir representacions més útils dels senyals. En aquest capítol també es proposen mètodes per trobar el valor dels paràmetres que cal ajustar per obtenir les representacions desitjades de cada senyal.

En el *Capítol 6*, per mostrar l'aplicació i la utilitat de la nova representació, es presenten diversos exemples de representació de senyals lineals i no lineals. En aquest cas les representacions s'obtenen fora de línia, a partir de senyals prèviament emmagatzemats.

En el *Capítol 7* s'estudia un dels principals problemes que afecta la representació descrita en el capítol anterior, el tractament de senyals amb soroll, i es proposen solucions encaminades a obtenir representacions afectades el mínim possible per aquest tractament. En un exemple d'aplicació en senyals procedents d'un sistema real es pot comprovar la necessitat d'aquest tractament i la utilitat de les solucions proposades.

En el *Capítol 8* es presenta la metodologia per obtenir la representació dels senyals en línia. La representació en línia és necessària per conèixer l'estat del procés supervisat en

cada instant de temps; en molts casos, en Detecció o diagnosi, és necessari tenir informació dels esdeveniments en el mateix moment en què es produeixen o, en el pitjor dels casos, tant aviat com sigui possible. En aquest capítol es presenten, també, les representacions obtingudes en línia d'alguns dels senyals estudiats en els exemples del capítol 6, i es posa de manifest la semblança de les representacions obtingudes en línia i fora de línia.

Finalment, el *Capítol 9* està dedicat a presentar les principals conclusions que es poden obtenir d'aquest treball i a proposar-ne les línies de continuació i els camps d'aplicació.

2. SUPERVISIÓ EXPERTA

2.1 Introducció

La creixent demanda de qualitat, seguretat, disponibilitat i eficiència de costos en els processos industrials fa que l'interès envers els sistemes tolerants a fallades sigui cada vegada més gran. La tolerància a fallades es pot aconseguir mitjançant tècniques passives o actives [37] :

- Les tècniques **passives** consisteixen en la utilització de controladors robustos que assegurin la insensibilitat a les fallades dels sistemes controlats. Aquesta solució permet la tolerància a petites fallades sense necessitat de tornar a configurar el sistema.
- Les tècniques **actives** es basen en l'acomodament a les fallades, en la reconfiguració del sistema en les situacions de fallada. Aquesta nova configuració es pot fer a diferents nivells: canvi de consignes, canvis en la sintonia dels reguladors o canvis estructurals. Aquesta solució permet evitar la degradació del tot el sistema a causa d'una fallada.

L'aportació d'aquest treball es pot emmarcar en el camp de les anomenades tècniques actives. Aquestes tècniques es poden agrupar en diverses tasques i es poden classificar de diferents maneres segons els mètodes que utilitzen. En aquest capítol es fa una breu descripció d'aquests aspectes fent èmfasi en aquells que centraran l'interès d'aquest treball, com són la utilització de la Intel·ligència Artificial (IA) i la necessitat de traducció de la informació numèrica que provingui dels processos en informació simbòlica susceptible de ser manipulada per les eines de la IA.

2.2 Tasques de Supervisió: Definicions

Les diverses tasques que cal portar a terme per fer que un sistema s'acomodi a les situacions de fallada són bàsicament la Detecció d'aquestes situacions, la identificació de les fallades i la determinació de les accions per restablir el funcionament normal. El conjunt d'aquestes tasques es coneix com a **Supervisió**, però la terminologia utilitzada per definir cadascuna d'aquestes tasques no és única. A continuació es presenten algunes definicions, extretes de [47], que intenten unificar la terminologia utilitzada en el camp de la Supervisió.

- **Fallada** (*Fault*): Desviació no permesa d'alguna propietat o variable característica del sistema.
- **Error** (*Error*): Desviació entre el valor mesurat o calculat i el desitjat o teòricament correcte en una variable de sortida.
- **Pertorbació**: Entrada del sistema no mesurable ni controlable (*Disturbance*). També s'entén com a pertorbació l'efecte que produeix aquesta entrada en el sistema (*Perturbation*).
- **Detecció de Fallades** (*Fault Detection*): Determinació de les fallades presents en un sistema i del temps de la detecció.
- **Aïllament de Fallades** (*Fault Isolation*): Determinació del tipus, la localització i l'instant de temps en què s'han produït les fallades. Es realitza després de la detecció.
- **Identificació de Fallades** (*Fault Identification*): Determinació de la magnitud i el comportament temporal d'una fallada. Es realitza després de l'aïllament.
- **Diagnosi de Fallades** (*Fault Diagnosis*): Determinació del tipus, la magnitud, la localització i l'instant de temps en que s'han produït les fallades. Es realitza després de la detecció.
- **Monitorització** (*Monitoring*): Tasca en temps real que consisteix en determinar les condicions de funcionament d'un sistema físic, emmagatzemant informació i reconeixent i indicant anomalies en el seu comportament.
- **Supervisió** (*Supervision*): Monitorització d'un sistema i determinació, en cas de fallada, de les accions apropiades per mantenir-ne el funcionament.

Frank [38] divideix la **Diagnosi de fallades** en tres parts:

- **Detecció de fallades** (*Fault Detection*): Detecció del temps d'ocurrència d'una irregularitat (fallada). Comporta la generació de residus o de símptomes que reflecteixin les fallades.
- **Aïllament de fallades** (*Fault Isolation*): Localització (classificació) de les diverses fallades. Comporta l'avaluació dels residus.
- **Anàlisi de fallades** (*Fault Analysis*): Determinació del tipus, la magnitud i la causa d'una fallada.

El paper de la Supervisió consisteix a detectar les situacions de fallada i també proposar accions per resoldre aquestes situacions. Per tant, les tasques bàsiques d'un sistema de Supervisió estan relacionades amb aquelles relatives a les fallades [42]. Només si una fallada és detectada i localitzada es poden prendre les mesures necessàries per resoldre la situació.

Una part molt important de la Supervisió se centra, doncs, en la Detecció i aïllament de les fallades i a donar informació sobre el seu origen i magnitud [37]. La Detecció i Diagnosi de les fallades constitueixen la part fonamental de la supervisió.

2.3 Detecció de fallades

Els mètodes de Detecció de fallades depenen clarament del procés i de la informació de què se'n disposa. A [70] es pot trobar una extensa classificació d'aquests mètodes (Fig. 2-1), i a [47] es fa una distribució de les aplicacions en aquest camp publicades en congressos entre 1991 i 1995.

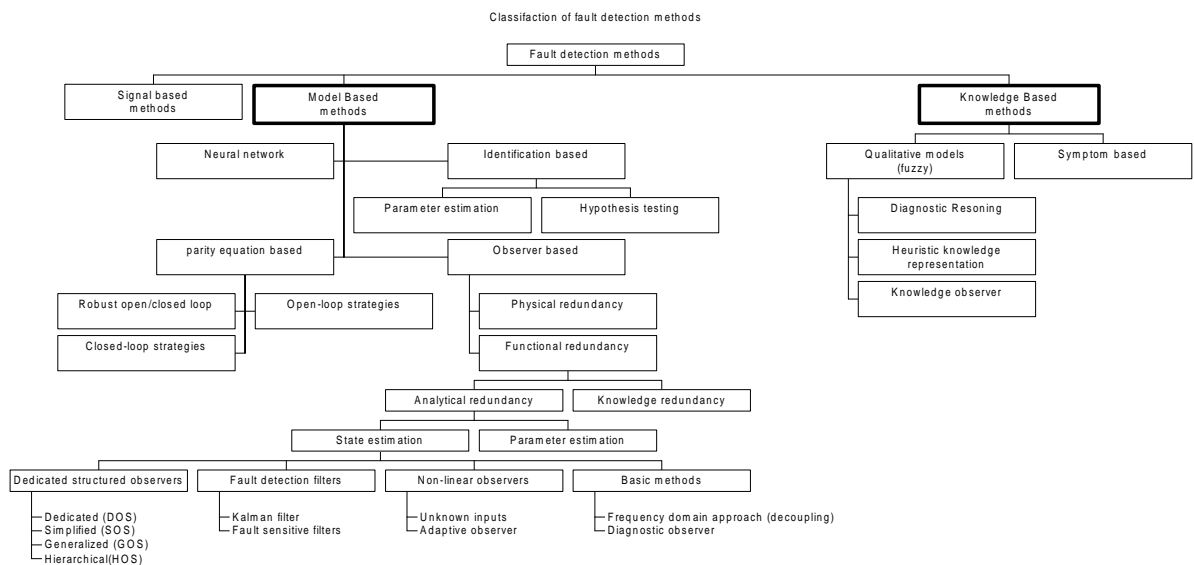


Fig. 2-1 Classificació dels mètodes de Detecció de Fallades [70].

En la Fig. 2-1 es pot observar la gran quantitat i diversitat de mètodes basats en models analítics; aquests mètodes utilitzen eines de processament del senyal o estadístiques per comparar les sortides mesurades i les simulades (considerant les mateixes entrades) per obtenir discrepàncies. L'inconvenient més gran d'aquests mètodes és la necessitat de models precisos. Quan no es disposa de models acurats, l'alternativa són els mètodes basats en coneixement. En les subseccions següents es descriuen els mètodes analítics basats en models i en senyals (utilitzant només les sortides del procés), i en la secció següent els basats en coneixement.

2.3.1 Detecció de fallades basada en models analítics

Hi ha una gran quantitat de mètodes basats en la utilització de models matemàtics per detectar fallades. Aquests mètodes es basen en la utilització de models per generar senyals addicionals que es comparen amb els senyals mesurats. Aquest procediment es coneix com **redundància analítica**. La tasca principal dels mètodes de Detecció de fallades basats en models és la generació de residus. Els **residus** representen canvis o discrepàncies en el procés i s'obtenen a partir de variables o de paràmetres. Per obtenir els residus, les dades obtingudes del procés es comparen amb les obtingudes del model.

Les dades procedents del model representen les condicions normals de funcionament considerant que les entrades són les mateixes del procés. Els residus es poden obtenir de diverses maneres en funció del model i mètode utilitzats :

- La **generació de residus basada en observadors** utilitza observadors o filtres de Kalman per reconstruir, a partir de les entrades, les sortides d'interès del sistema. L'error entre les dades reals i les estimades o una funció seva s'utilitza com a residu.
- L'aproximació basada en l'**espai de paritat** consisteix en la comprovació de la consistència de les **equacions de paritat** (per exemple les equacions del sistema modificades) utilitzant els senyals mesurats [73]. Les equacions de paritat desacoblen els residus de manera que indiquin les inconsistències corresponents a les diferents fallades. Aquesta aproximació es pot considerar com una classe especial de la basada en observadors [12].
- L'**estimació de paràmetres** es basa en la suposició que les fallades es produeixen en els paràmetres físics del sistema (massa, fregament, resistència ...). Els paràmetres matemàtics del sistema s'estimen en línia utilitzant un model del sistema. La correspondència entre els paràmetres matemàtics del model i els paràmetres físics del sistema permet estimar els segons i comparar-los amb els de referència, obtinguts a partir del model sense fallades.

La Detecció de fallades basada en models ha rebut una considerable atenció en els últims anys, en què han aparegut molts estudis i aplicacions [8, 36, 38, 49, 71, 72, 93].

2.3.2 Detecció de fallades basada en senyals

Els mètodes basats en senyals tracten d'extreure dels senyals que provenen del procés tanta informació com es pugui sobre les possibles fallades. En aquest cas es tracta d'obtenir els símptomes (canvis en el comportament) de les fallades. Per assolir aquest objectiu es poden utilitzar tècniques d'estadística, probabilitat, anàlisi temporal o freqüencial i, en general, totes les tècniques de reconeixement de formes. Aquests mètodes no necessiten un model del sistema, sinó que es basen en les relacions que hi ha entre les mesures i les condicions en què es troba el procés. Això requereix un procés previ d'aprenentatge, per la qual cosa poden ser considerats mètodes basats en coneixement.

Estudis sobre la utilització de mètodes estadístics o de reconeixement de formes en Detecció de fallades i Diagnosi es poden trobar a [8] i a [26] respectivament.

2.4 Detecció i Diagnosi de fallades basades en coneixement

Les tècniques basades en coneixement es poden utilitzar en la fase de Detecció i en la de diagnosi; es a dir, poden ser aplicats tant en la generació de residus com en la seva avaluació i en l'anàlisi de les fallades. En la fase de generació de residus s'utilitzen quan no es poden obtenir models matemàtics prou bons, i, en les altres per avaluar els residus que poden ser obtinguts utilitzant o no mètodes analítics. L'avaluació de residus és un

procés complex que requereix decisions intel·ligents, utilitzant tècniques com Rastreig de fallades, Arbres de fallades, Xarxes de Petri, reconeixement de formes incloent tècniques de Lògica Difusa o Xarxes Neurons o Sistemes Experts. Quan els mètodes basats en coneixement s'utilitzen en totes les fases de la diagnosi, la separació entre aquestes fases no és tan clara com en el cas d'utilització de mètodes analítics.

Les tècniques de Diagnosi basades en coneixement es poden dividir en dues categories [38]:

- **Diagnosi de fallades basada en símptomes:** Comporta la utilització de símptomes obtinguts de manera heurística o coneixements històrics o estadístics del procés, que són avaluats per Sistemes Experts de Diagnosi. Els problemes associats a aquesta categoria se centren en l'adquisició del coneixement i en la seva representació.
- **Diagnosi de fallades basada en models qualitius:** En aquest cas el coneixement s'obté de l'estructura i el comportament del procés. A diferència dels models analítics, els models qualitius poden ser incomplets o poden incloure incertesa.

La problemàtica comuna a aquestes dues categories i, en general, en totes les tècniques basades en coneixement, és la necessitat de traduir els senyals numèrics que provenen dels processos en dades qualitatives (símbols) que puguin ser utilitzades amb aquestes tècniques. Les diverses aproximacions a la traducció de números en símbols es descriuen en la secció 2.6.

2.5 Supervisió experta. Necessitat d'Intel·ligència Artificial en Supervisió

S'entén com a **Supervisió Experta** la Supervisió que utilitza eines de la IA. La necessitat d'incorporar coneixement expert i, per tant, eines de la IA és present en totes les fases de la Supervisió de processos. Com ja s'ha introduït en les seccions anteriors, la Intel·ligència Artificial pot ser útil en la Detecció de fallades, però és necessària en la diagnosi, encara que la Detecció es dugui a terme mitjançant mètodes analítics. La utilització de Sistemes Experts o Xarxes Neurons per Classificació, dels Arbres de fallades per Anàlisi o de Raonament Difús per tractar la incertesa són exemples representatius de la utilització de la IA en Diagnosi.

A més, l'objectiu final de la Supervisió, que és el de determinar les accions adequades per a cada tipus de funcionament, requereix la presa de decisions, tasca que no es pot assolir mitjançant mètodes purament analítics. Actualment la tasca de prendre decisions es reserva principalment a les persones a causa de les dificultats de representació del coneixement en sistemes de Supervisió Experta i en la validació d'aquests sistemes.

La Supervisió Experta ha d'integrar el tractament de dades numèriques i simbòliques i coneixement a diferents nivells, que han de ser manipulats per eines analítics o de la IA [65]. Dins el context de la Supervisió, les dades que s'han de tractar poden ser de naturalesa molt variada: imprecises (sorolls de mesura), incompletes (fallades en els sensors, models incomplets ...), no homogènies (mesurades, estimades, numèriques, qualitatives ...), en funció del context (llindars, observacions qualitatives,...), temporals Al mateix temps, les tasques humanes en Supervisió es basen moltes vegades en

heurístiques difícils de formalitzar en models matemàtics: correlacions entre variables molt diferents, observacions qualitatives (color, fressa,...), estadístiques (aquest aparell porta molts problemes) o intuïcions. Totes aquestes percepcions són difícils de quantificar, però s'han demostrat com a eficaces.

Dos dels principals problemes de la Supervisió Experta són [42]:

- **Traducció numèric-simbòlic.** Donada la gran quantitat d'informació numèrica disponible, la diferent naturalesa de les dades i, moltes vegades, la incertesa, la imprecisió o la incompletesa de les mesures, la traducció de números en símbols ha de ser una tasca fiable. Al mateix temps ha de donar com a resultat informacions fàcils d'interpretar i utilitzar.
- **Tractament del temps.** Els temps és una variable fonamental quan s'estudien sistemes dinàmics. Però, alhora, és difícil de tractar simbòlicament: cal saber exactament quan s'ha produït una fallada o quan ha de passar, però normalment el funcionament normal es degrada fins a arribar al funcionament anormal. Els sistemes de control discretitzen el temps d'una manera síncrona, amb temps de mostratge constant; en canvi, els Sistemes de Supervisió demanden un tractament asíncron del temps, els esdeveniments interessants no es produeixen periòdicament.

2.6 Traducció numèric-simbòlic

En aquesta secció es descriuran diverses metodologies per obtenir informació simbòlica a partir d'informació numèrica. La traducció de números en símbols és una de les tasques tractades en el camp de la Física Qualitativa. Considerada com una subdisciplina de la Intel·ligència Artificial, la Física Qualitativa té com a objectiu la descripció qualitativa dels sistemes físics. Tracta de representar els sistemes i explicar el seu comportament basant-se, al mateix temps, en el sentit comú utilitzat per l'ésser humà per analitzar qualitativament l'entorn i en el coneixement científic utilitzat pels enginyers [9].

El Raonament Qualitatiu es considera com un domini de la Intel·ligència Artificial des de 1984, que aparegué un número especial de la revista *Artificial Intelligence*, i es basa en tres grans eixos :

- **Modelització de dispositius** mitjançant formalismes que permeten descriure el seu comportament manipulant coneixements imprecisos o incomplets: àlgebres qualitatives, ordres de magnitud absoluts o relatius, modelitzacions causals ...
- **Simulació del comportament d'un sistema** per obtenir el funcionament d'un sistema a partir de la seva descripció. Mentre que una simulació numèrica genera una trajectòria del sistema, una simulació qualitativa ha de generar conjunts de totes les trajectòries possibles.
- **Interpretació i/o explicació del funcionament d'un sistema** per obtenir conclusions a partir de les quals poder raonar.

A continuació es presenten diferents aproximacions al problema de la traducció numèric-simbòlic. Es distingeix entre aquelles que proposen la representació qualitativa de les variables i dels sistemes físics i de les equacions o relacions causals que permeten simular el seu comportament, i aquelles altres aproximacions que únicament tracten de traduir els senyals que provenen dels processos en símbols susceptibles de ser manipulats per altres eines de la Intel·ligència Artificial. Mentre que les primeres permeten obtenir simulacions i, per tant, es poden utilitzar per obtenir residus, en Diagnosi basada en models, les segones es poden utilitzar per avaluar els residus o els símptomes en general. També es presenta l'aplicació de la Lògica Difusa en Supervisió en les tasques de simulació i d'avaluació de residus o símptomes.

2.6.1 Modelització i simulació qualitatives.

La modelització i simulació qualitatives s'iniciaren a principis dels anys 60, que es mostrà com es podien representar alguns sistemes econòmics amb models qualitatius dels quals es poden extreure conclusions significatives [58]. La posterior evolució, motivada en gran part per la seva utilitat en diagnosi, desemboca en l'àrea de la Física Qualitativa o Raonament Qualitatiu. Dins dels conceptes de Modelització i Simulació qualitatives s'hi poden englobar punts de vista molt diferents [76]. A continuació es presenten algunes aproximacions, encara que no representen una visió exhaustiva, la qual es pot trobar a [20,90].

2.6.1.1 Confluències

La modelització de de Kleer [23] és la més senzilla de les utilitzades en Física Qualitativa: les variables són descrites en l'espai-quantitat $\{-, 0, +\}$ i es denoten com $[X]$:

$$[X] = + \text{ si } X > 0$$

$$[X] = 0 \text{ si } X = 0$$

$$[X] = - \text{ si } X < 0$$

L'ajuda del valor qualitatiu indeterminat '?' en l'espai quantitat permet definir les lleis de suma qualitativa (\oplus) i producte qualitatiu (\otimes), interns a $\{-, 0, +, ?\}$. La derivada d'una variable també pot prendre el seu valor en l'espai-quantitat i permet modelitzar les tendències de les variables. L'estat d'un sistema, aleshores, queda definit pel valor qualitatiu de totes les seves variables i de llur derivada.

Les *confluències* modelitzen qualitativament el comportament dels sistemes i es poden deduir a partir de les equacions quantitatives substituint les variables per variables qualitatives. El comportament d'un sistema es descriu, aleshores, com una successió d'estats: els temps és implícitament modelat per episodis, en els quals el sistema roman en el mateix estat (cada variable té el valor qualitatiu i la derivada qualitativa constants). El conjunt d'estats possibles i transicions entre ells es representa mitjançant un diagrama d'estats.

2.6.1.2 QSIM [57]

Kuipers generalitza la noció d'espai-quantitat a tot conjunt ordenat de valors remarcables, construït de manera que qualsevol valor qualitatiu es pot definir amb l'ajuda de relacions d'ordre en aquest espai.

Una variable qualitativa X és una funció contínua en el temps amb un nombre finit de valors remarcables (normalment un valor de referència i els valors on s'anul·la la derivada). El seu valor qualitatiu $[X]$ es defineix en relació a la seva posició en aquest conjunt de valors remarcables, que pot ser variable en funció de la descoberta de nous valors remarcables. Si el conjunt de valors remarcables és $\{l_1, \dots, l_k\}$, aleshores :

$$[X] = l_j \text{ si } X = l_j$$

$$[X] = (l_j, l_{j+1}) \text{ si } X \in] l_j, l_{j+1}[$$

la derivada qualitativa $[X']$ en un instant es defineix pel seu signe en l'espai quantitat $\{-, 0, +\}$ i l'estat qualitatiu d'una variable X a l'instant t_i , $QS(X, t_i)$, queda definit per la parella $\{[X], [X']\}$. L'estat qualitatiu d'una variable en un interval $[t_i, t_{i+1}]$, $QS(X, t_i, t_{i+1})$, es defineix, únicament si és constant, com igual a $QS(X, t_j)$, $t_j \in [t_i, t_{i+1}]$.

Les transicions poden ser entre un instant i un interval o entre un interval i un instant. L'algorisme QSIM constitueix un arbre que representa tots els comportaments possibles del sistema.

2.6.1.3 Formalisme dels ordres de magnitud relatiu

Els ordres de magnitud relatiu es basen en la comparació qualitativa de variables. Igualment que els ordres de magnitud absoluts aporten un nivell d'abstracció més baix que l'àlgebra dels signes amb l'objectiu d'obtenir resultats menys ambigus.

El sistema FOG [80] es basa en tres relacions de comparació *Ne* (negligible), *Co* (comparable) i *Vo* (veí). Un conjunt de 32 regles d'inferència, deduïdes intuïtivament, permet manipular aquests tres operadors. Les limitacions d'aquest sistema són que en alguns casos hi ha problemes de consistència a causa del fet que les regles són massa intuïtives i que no permet la manipulació de valors numèrics.

Mavrovouniotis i Stephanopoulos [63] proposen un sistema, $O(M)$, amb 7 relacions primitives: *molt inferior a*, *moderadament inferior a*, *lleugerament inferior a*, *exactament igual a*, *lleugerament superior a*, *moderadament superior a* i *molt superior a*. A partir d'aquestes relacions primitives s'estableixen 21 relacions compostes (per exemple *inferior o igual a*) que permeten tractar informacions menys precises. La relació entre dues variables a i b , aRb , s'estableix assignant a a/b un interval d'una partició de l'eix real. Les fronteres entre els intervals d'aquesta partició es defineixen a partir d'un sol paràmetre ε , que representa la quantitat més gran negligible enfront la unitat, que representa la relació *exactament igual a*.

Dague [19] afegeix al sistema FOG la relació binària *Di* (distant), amb la qual cosa dona lloc al sistema ROM, compost per 44 regles que inclouen les de FOG. El

raonament pot ser aplicable també al conjunt dels reals, cosa que permet la integració d'informacions numèriques.

2.6.1.4 Formalisme dels ordres de magnitud absoluts [89]

Travé-Massuyès i Piera generalitzen l'univers de descripció d'una variable qualitativa a tota partició ordenada de l'eix real. L'espai de quantificació usual $\{-, 0, +, ?\}$ s'afina per obtenir una descripció més precisa. Com més fina és la partició més precisa és la descripció de les variables. Els ordres de magnitud definits d'aquesta manera són absoluts; les fronteres dels intervals són definides a priori, i cada subconjunt es caracteritza per una etiqueta qualitativa. Una partició clàssica comporta 7 símbols: *positiu gran, positiu mitjà, positiu petit, zero, negatiu petit, negatiu mitjà i negatiu gran*.

L'univers de descripció descrit d'aquesta manera, estructurat en una àlgebra qualitativa, permet treballar en un espai més sofisticat que el dels signes. La igualtat qualitativa entre dues variables es defineix com 'la possibilitat de ser iguals', si els dos subconjunts de reals que les representen tenen una intersecció no nul·la. Les propietats dels operadors qualitativs (+, -, *, /) depenen de la partició de l'eix real i, en general, no compleixen les propietats d'associativitat, transitivitat i/o distributiva; això fa que sigui difícil tractar amb sistemes d'equacions amb moltes variables.

2.6.1.5 Simulació a partir de funcions de transferència qualitatives (FTQ) [60,32]

Les funcions de transferència qualitatives (FTQ) es basen en una discretització del temps en **episodis**, de manera que a cada episodi l'evolució temporal de la variable es pot aproximar linealment. D'aquesta manera, un episodi *ei* es caracteritza per un esdeveniment a l'instant de començament *ti*, l'amplitud a *ti*, $A(ei)$, i el pendent de la recta per la qual s'aproxima l'evolució de la variable $P(ei)$.

$$ei = \langle ti, A(ei), P(ei) \rangle$$

Les funcions de transferència qualitatives es defineixen a partir de la seva resposta als episodis que formen l'evolució dels senyals. Aquesta resposta també està formada per episodis que, en conjunt, aproximen la resposta d'alguna funció de transferència clàssica. Com que els episodis que componen l'entrada de una FTQ són graons o rampes, la resposta de la FTQ és la suma de les aproximacions a les respostes a aquests graons i rampes que formen l'entrada.

2.6.1.6 Teoria de processos qualitativs (QPT) [33]

El formalisme QPT (*Qualitative Process Theory*) es basa en el concepte de procés qualitatiu per representar el comportament d'un sistema. Un procés està format per diferents components i especifica la influència entre ells en termes de canvis possibles en els seus paràmetres. Els components són *objectes* i descriuen les entitats elementals

del sistema estudiat (variables en una equació diferencial, components elementals d'una estructura mecànica ...). L'estat dels objectes està caracteritzat per paràmetres.

2.6.1.7 Simulació causal a partir d'autòmats qualitius (Ca-En) [10]

En el sistema Ca-En es proposa un formalisme de raonament basat en la utilització conjunta d'equacions matemàtiques i xarxes causals. Un procés està representat per dos nivells: el **nivell baix**, que és una xarxa causal, i el **nivell alt**, compost d'equacions analítiques. El temps està representat per un conjunt discret i ordenat d'instantis; la distància entre dos instants consecutius, la **unitat temporal**, es tria de manera que totes les dinàmiques d'interès dels sistema puguin quedar reflectides.

En el nivell baix, els nodes de la xarxa causal són **autòmats qualitius** que representen la dinàmica d'una variable i els coneixements per raonar-hi. Els dominis de definició de les variables numèriques es parteixen en **espais de qualitats**, i les seves variacions admissibles en una unitat temporal en **espais de variacions**. Els arcs de la xarxa corresponen a relacions d'influència entre autòmats, que poden ser de causa - efecte o informatives.

2.6.1.8 ALCMEN [2][3]

ALCMEN (*Automaticians Language for Causal Modelisation for Expert kNowledge*) és un llenguatge modular que utilitza conjuntament les tècniques numèriques clàssiques i tècniques qualitatives. Els sistemes dinàmics es representen barrejant conceptes qualitius i quantitius, i manipulant simultàniament diferents tipus d'imprecisions i incerteses.

La topologia del sistema es representa per una xarxa de blocs elementals, els **blocs qualitius**, que modelen les parts poc conegudes i es connecten amb blocs quantitius clàssics, com per exemple funcions de transferència.

Les variables numèriques es qualifiquen en diversos nivells, els quals tenen assignats una etiqueta qualitativa i un número enter que serveixen per identificar-les i per operar-hi qualitativament. Les operacions amb variables qualitatives poden ser estàtiques o dinàmiques i utilitzen els enters assignats a cada nivell.

2.6.2 Lògica Difusa

En els últims anys han aparegut gran quantitat d'aplicacions del Raonament Difús en l'enginyeria i especialment en el camp del control automàtic. Lògicament, també hi ha aplicacions en camps relacionats, com són la Modelització i Simulació i la Supervisió. La Modelització i Simulació forma part de la Supervisió en la tasca de generació de residus. La utilitat de la Lògica Difusa en Supervisió i Diagnosi ve motivada pel fet que permet operar amb informacions difuses, variables lingüístiques i regles d'una manera similar al pensament humà, a la forma natural de pensar. Les aplicacions de la Lògica

Difusa en Supervisió i Diagnosi es poden dividir entre la generació de residus utilitzant models difusos i l'avaluació de residus o símptomes utilitzant Lògica Difusa [39].

2.6.2.1 Generació de residus basada en models difusos

En aquest cas els models difusos es poden utilitzar de la mateixa manera que els qualitatius. De fet, molts dels simuladors que utilitzen lògica difusa s'han elaborat a partir de simuladors qualitatius. Dubois i Prade [28] utilitzen conjunts difusos per representar les relacions de negligibilitat i veïnatge en models utilitzant ordres de magnitud, si bé en una aproximació estàtica. FuSim [86] és una extensió de QSIM on les variables es representen mitjançant conjunts difusos caracteritzats per funcions de pertinença (Fig. 2-2) i es relacionen mitjançant regles.

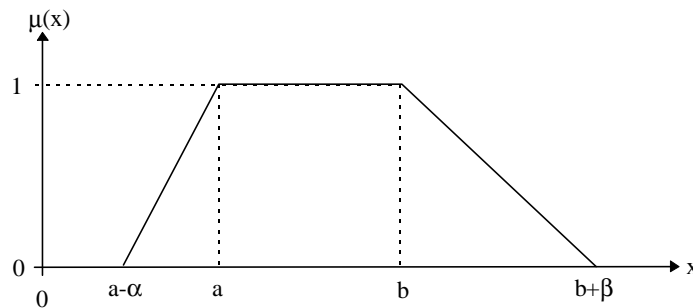


Fig. 2-2 Funció de pertinença d'una variable difusa.

2.6.2.2 Avaluació de residus o símptomes utilitzant lògica difusa

L'avaluació de residus és un procés que requereix decisions lògiques. Utilitzant Lògica Difusa aquest procés es pot dividir en tres etapes tal com es mostra en la figura Fig. 2-3.

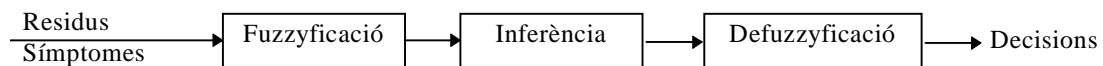


Fig. 2-3 Esquema de l'avaluació de residus o símptomes utilitzant Lògica Difusa.

La 'fuzzyficació' permet descriure els llindars de manera difusa, la qual cosa aporta una més gran robustesa. La inferència permet concloure les possibles fallades a partir del conjunt de residus o símptomes utilitzant una base de coneixement expressada en forma de regles. Finalment la 'defuzzyficació' converteix la informació sobre les fallades en decisions ; aquesta tasca es pot deixar a mans d'operadors humans.

2.6.3 Representació qualitativa d'informacions numèriques

En la modelització i simulació qualitatives, les variables o components dels sistemes físics són representats simbòlicament, i els models resultants són els encarregats de manipular aquests símbols en forma d'equacions o relacions entre ells. En Supervisió

Experta, però, pot no ser necessària la utilització de models. Es pot tenir un coneixement directe (normalment heurístic) que relacioni els estats del procés o el seu comportament amb les informacions en forma de senyals que en provenen. Per utilitzar aquest coneixement (Diagnosi basada en senyals o en símptomes) calen eines que representin qualitativament i d'una manera natural els senyals. A continuació es presenten algunes d'aquestes eines. De totes elles, la primera es descriu en més profunditat en el capítol següent.

2.6.3.1 Representacions basades en episodis

La representació dels senyals basada en episodis és utilitzada en algunes de les modelitzacions qualitatives descrites anteriorment i comporta dues tasques d'abstracció igualment importants. D'una banda, es qualifiquen les característiques numèriques del senyal (entenen com a característiques numèriques el valor del senyal, les variacions, o altres dades numèriques interessants). I, de l'altre, el temps es tracta explícitament, dividint-lo en intervals significatius.

Les principals utilitats de les representacions basades en episodis des del punt de vista de la Supervisió es poden resumir en:

- Traducció numèric-simbòlic.
- Compressió i simplificació de les dades numèriques, conservació d'un mínim de dades numèriques.
- Compatible amb descripcions purament simbòliques fetes per experts.
- Tractament asíncron del temps, simplificació des del punt de vista temporal.

Per tots aquests motius, s'ha triat la representació en episodis com l'eina més adequada per a realitzar una descripció simbòlica dels senyals que tingui com a objectiu facilitar i simplificar les tasques de supervisió, pensant que aquestes tasques són realitzades per eines pròpies de la Intel·ligència Artificial. En el capítol següent es presenta una formalització de les representacions basades en episodis i diverses aproximacions.

2.6.3.2 Histogrames

Els histogrames es basen en l'estudi dels senyals en finestres temporals [84,85]. Amb la seva utilització s'intenta establir una analogia amb la reacció d'un expert que observa els senyals [81]. Els histogrames constitueixen una divisió del rang de valors del senyal en **zones significatives** i l'estudi de l'evolució del senyal durant un període de temps anomenat **finestra d'observació**. Aquest estudi consisteix a determinar, en el període de la finestra, el temps que el senyal és a cada zona significativa (si el senyal és mostrejat s'haurà de comptar el nombre d'instants de mostratge que el senyal és a cada zona).

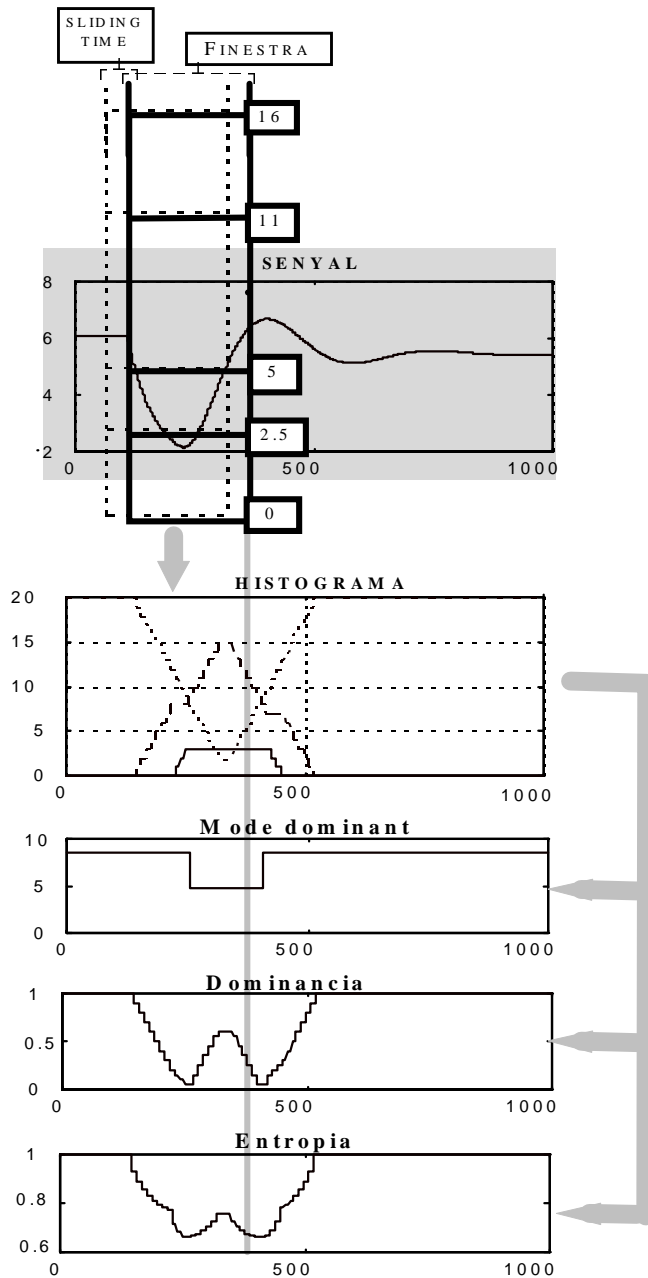


Fig. 2-4 Índexs de l'histograma.

D'aquesta manera, l'histograma es componrà d'un vector (H_1, \dots, H_z) , z =nombre de zones) amb el nombre de punts o la durada a cada zona $_i$. A partir d'aquest vector es poden calcular una sèrie d'índexs que ens aportaran l'informació útil per a les tasques de Supervisió. Aquests índexs són el **Mode dominant**, la **Dominància** i l'**Entropia**.

- **Mode dominant:** És la zona significativa més freqüentada, és a dir, aquella per la qual l'histograma pren el valor màxim. Aquest índex dóna una interpretació aproximada del valor del senyal, i la seva fórmula ve donada per:

$$\text{Mode} = \text{zona}_j \text{ t.q. } H_j = \max_{i=1 \dots z}$$

- **Dominància:** Està definida com la diferència entre la durada (o el nombre de punts) de les dues zones més freqüentades. Ens mostra de quina manera és més freqüentat el mode dominant respecte als altres.

$$\text{Dominància} = H_i - H_j$$

t.q. $\text{zona}_i = \text{Mode}$ i $\text{zona}_j = \text{segona zona més freqüentada}$

- **Entropia:** Ens permet representar la diversitat de zones. Com més gran sigui aquesta diversitat, més zones amb un nombre de punts diferents hi haurà. La seva fórmula vindrà donada per :

$$\sum H_j(\log(H_j)) \text{ si } H_j > 0$$

A l'hora de treballar amb histogrames, és molt important la tria de les zones significatives i de la durada de la finestra. S'ha d'intentar que cada zona sigui característica d'alguna situació; per exemple, si el que es pretén és fer Detecció de fallades es pot triar una zona de funcionament normal i una zona per cada possible situació de mal funcionament. La durada de la finestra d'observació determinarà els índexs i , sobretot, els canvis de mode dominant; s'ha de procurar triar la durada de manera que no es produeixin canvis molt freqüents del mode dominant i que, quan es produeixin, siguin significatius.

2.6.3.3 Tendència i oscil·lació qualitatives [17]

Aquesta eina d'abstracció es basa en la combinació de tècniques quantitatives i de conversió numèric-simbòlic: utilització de diversos filtres per separar les variacions del senyal i les oscil·lacions que acompanyen aquestes variacions i una posterior qualificació. Els resultats finals són dues dades qualitatives que s'han anomenat **tendència** i **oscil·lació**, que permeten deduir el **règim** del senyal. A continuació es descriu breument el funcionament d'aquesta eina i de la informació que proporciona. En les figures Fig. 2-5 a Fig. 2-7 es veuen els resultats de l'aplicació sobre un senyal mesurat.

- **Tendència**

La característica més important i més útil que podem abstrure del senyal és la seva 'tendència' a pujar, baixar o mantenir-se. Per aquest motiu, a partir de les dades disponibles en cada instant de temps es fa una estimació d'aquest concepte. L'estructura d'aquest algorisme és la següent:

1. *Filtratge del soroll* :Aquest primer filtratge és necessari per poder fer el tractament posterior del senyal.
2. *Detecció de màxims, mínims, punts d'inflexió i salts*: Cada un d'aquests casos s'identifica de manera diferent, guardant l'instant de temps en què s'ha detectat. La detecció d'aquests esdeveniments s'utilitza en el pas següent però pot ser útil, a més, per si mateixa.

3. *Filtratge del senyal:* A partir dels màxims, mínims i punts d'inflexió detectats es fa una estimació del període del senyal, i a partir d'aquesta estimació es calcula la freqüència de tall d'un filtre passa baix que s'aplica, a continuació, al senyal; aquest filtre canviarà, doncs, cada vegada que es produeixi una detecció. En el cas que es detecti un salt bruscat del senyal el que es fa és desactivar el filtre fins que es produeixi una nova detecció, d'aquesta manera no es perdrà aquesta informació. Com a resultat s'obté un senyal 'arrodonit', sense oscil·lacions.
4. *Gradient del senyal filtrat:* L'objectiu és obtenir la tendència del senyal. Per aquest motiu, després d'haver efectuat el filtratge anterior, obtindrem el pendent del senyal, que en definitiva serà el que ens indicarà la tendència a pujar, baixar o mantenir-se. La manera més senzilla de calcular-lo serà restant el valor anterior del valor actual.
5. *Qualificació del gradient obtingut:* Es classifica el pendent obtingut en diferents nivells. Per exemple:

| | |
|----|--------------------|
| 2 | a_pujar |
| 1 | a_pujar_lentament |
| 0 | es_manté |
| -1 | a_baixar_lentament |
| -2 | a_baixar |

Aquesta classificació es fa segons els valors màxims i mínims del gradient obtingut al pas anterior. Per això, com en el pas 1, també cal tenir un coneixement previ del comportament del senyal.

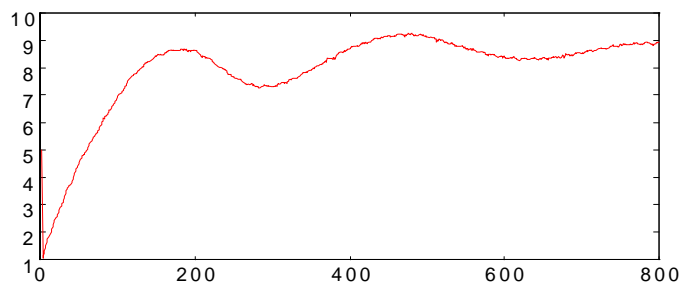


Fig. 2-5 Senyal mesurat.

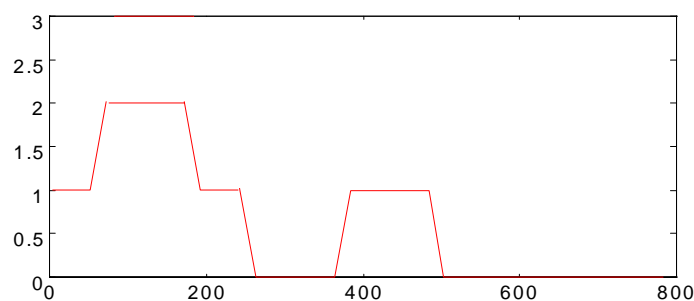


Fig. 2-6 Tendència.

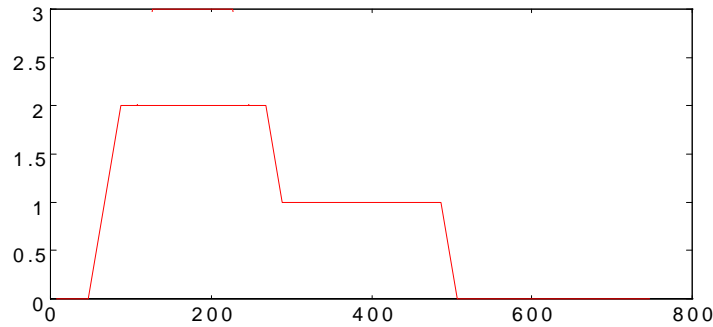


Fig. 2-7 Oscil·lació.

- **Oscil·lació**

Una altra característica important que podem abstrure del sistema és l'amplitud d'oscil·lació dels senyals. Per això, s'ha creat un algorisme, continuació de l'anterior, que segueix els passos següents:

6. *Valor absolut del senyal original menys el senyal filtrat:* Es resta el senyal filtrat (obtingut en el pas 3) del senyal original i es fa el valor absolut, de manera que el resultat ens dóna una idea de l'amplitud de l'oscil·lació a cada instant.
7. *Filtratge del resultat del pas anterior:* Es filtra el senyal resultant de manera que el resultat és un senyal més 'arrodonit', amb canvis menys bruscos, més fàcil de qualificar.
8. *Qualificació del senyal obtingut a l'apartat anterior :*Es qualifica el grau d'oscil·lació obtingut en nivells, per exemple:

| | |
|---|--------------------|
| 2 | oscil·lació gran |
| 1 | oscil·lació petita |
| 0 | no oscil·la |

- **Règim**

En general, podem fer una primera divisió del règim entre transitori i estacionari o permanent. Per determinar en quin règim es troba el senyal, partirem de la tendència i del grau d'oscil·lació (tindrem règim permanent quan el senyal tingui tendència a mantenir-se i no presenti oscil·lacions). És a dir, podrem fer una qualificació del règim, p. ex.:

| | |
|---|-----------------|
| 0 | permanent |
| 1 | quasi permanent |
| 2 | transitori |

2.7 Conclusions

La Supervisió de Processos és la disciplina en la qual s'agrupen les diverses tasques encarregades de mantenir el bon funcionament dels processos. La diversitat de mètodes i tècniques per dur a terme aquestes tasques fa que sigui difícil, en molts casos, separar-les i classificar-les. La Detecció i la Diagnosi de fallades són les més importants d'aquestes tasques, i les que han generat més estudis i publicacions.

La diferent naturalesa de les dades que s'han de tractar i dels coneixements que es poden utilitzar fa que els mètodes basats en coneixement siguin, en molts casos, necessaris en la Supervisió de processos per complementar els mètodes analítics o per millorar-los. Els mètodes basats en coneixement, que són aquells que utilitzen eines de la Intel·ligència Artificial (IA), constitueixen el que es coneix com Supervisió Experta de processos. La necessitat d'incorporar coneixement expert i, per tant, eines de la IA pot ser present en totes les fases de la Supervisió de processos.

Una tasca important en Supervisió és el tractament dels senyals que provenen del procés per tal de facilitar el desenvolupament d'altres eines que manipulin o raonin sobre aquests senyals. La IA manipula símbols, per tant, necessita eines que s'encarreguin del tractament dels senyals numèrics per obtenir-ne informacions simbòliques susceptibles de ser utilitzades per altres eines de la IA. Aquesta tasca és coneguda com traducció numèric-simbòlic.

La traducció numèric-simbòlic és necessària tant en la Diagnosi basada en símptomes com en la basada en models qualitius. En el primer cas, per obtenir i representar els símptomes, i, en el segon, com a part de la modelització i simulació qualitatives.

3. LA REPRESENTACIÓ DELS SENYALS BASADA EN EPISODIS

3.1 Introducció, motivacions

Les motivacions per utilitzar representacions dels senyals basades en episodis en Supervisió de processos provenen de les pròpies necessitats dels sistemes de Supervisió. Algunes d'aquestes necessitats ja han estat comentades en el capítol anterior. A continuació, es presenta una descripció dels diferents aspectes que afecten a la Supervisió sobre els quals la representació dels senyals basada en episodis ofereix un tractament adequat a les necessitats. Aquest tractament afecta a la representació del coneixement i dels senyals que provenen del procés, facilitant les tasques i el desenvolupament dels sistemes de Supervisió.

3.1.1 Necessitat de raonament qualitatiu

La necessitat de raonament qualitatiu ja ha estat comentada anteriorment. La incertesa, la incompletesa i la heterogeneïtat de les dades que cal manipular fan que el raonament qualitatiu representi una bona eina per a la realització de les tasques de Supervisió de processos. En la part que afecta a la representació de senyals, el raonament qualitatiu aporta els diversos mètodes i tècniques de traducció numèric-simbòlic ja descrits. La representació dels senyals basada en episodis és un d'aquests mètodes que, a més de traduir els senyals en símbols, té en compte el temps, d'una manera compacta i natural. Aquests altres aspectes són descrits a continuació.

3.1.2 Necessitat de raonament temporal

Els temps és una variable fonamental quan s'estudien sistemes dinàmics. En Supervisió de processos no és suficient tractar amb informació instantània, sinó que és necessari

manipular o raonar sobre el comportament històric dels senyals. Cal saber què ha passat i quan ha passat, o què ha passat abans. Per aquest motiu, el temps ha de ser tractat explícitament en la descripció dels senyals. La representació dels senyals basada en episodis permet representar el temps de manera que sigui fàcil raonar sobre els senyals tenint en compte els instants en què ha passat alguna cosa o la durada de les diferents situacions que es produeixen.

3.1.3 Necessitat de representar el coneixement d'una forma compacta

La gran quantitat de senyals que provenen dels processos i la necessitat d'emmagatzemar l'evolució històrica d'aquests senyals fan que la quantitat d'informació disponible sigui moltes vegades impossible de tractar adequadament. Aquest problema no solament es presenta en Supervisió, sinó també en altres camps [29,30,31]. Calen eines que permetin abstracteure, de tota la informació disponible, aquella que sigui realment necessària. Aquesta abstracció es pot fer de dues maneres:

- Des del punt de vista de les característiques del senyal, cal separar les que són necessàries de les que no ho són (soroll, dinàmiques molt ràpides o molt lentes...). Per exemple, si el que interessa és saber si un senyal s'assembla a un altre, no cal saber l'evolució completa dels dos senyals, sinó únicament un índex que indiqui el grau de similitud.
- Des del punt de vista temporal, no cal disposar de tota l'evolució temporal dels senyals, sinó únicament d'aquells esdeveniments (instantanis o no) que el fan característic de determinades situacions.

La representació dels senyals basada en episodis permet un tractament adequat dels senyals des d'aquests dos punts de vista.

3.1.4 Necessitat de representar el coneixement d'una forma natural

Moltes vegades el coneixement que es té dels processos i que es pot utilitzar en Supervisió prové de l'experiència acumulada pels operadors i experts en el procés. Aquest coneixement no es descriu mitjançant dades concretes en instants determinats, sinó que, d'una manera natural, es descriu mitjançant descripcions de situacions.

La representació dels senyals basada en episodis facilita la utilització d'aquest tipus de coneixements, ja que la descripció que fa dels senyals és molt semblant a la que pot fer una persona que els observi. Per exemple, si es vol descriure la resposta d'un sistema de primer ordre a un graó, qualsevol persona amb coneixements de Control ho farà més o menys de la següent manera:

'En l'instant inicial del graó el senyal comença a pujar de cop i segueix pujant cada vegada més lentament fins que s'estabilitza quan ha passat un temps d'aproximadament 5 vegades la constant de temps del sistema'

Un altre cas que no té res a veure amb la Supervisió de processos però que permet veure la naturalitat de la descripció en episodis, ve donat, per exemple, quan es vol explicar la vida d'una persona en poques paraules, es pot fer de la següent manera:

'En Fred va néixer a Montana el 1910, on va créixer. Entre 1928 i 1936 va estudiar a Massachusetts, i va passar la resta de la seva vida a Alaska, on va morir el 1980.[92]'

La divisió del temps en esdeveniments importants i en intervals en què no hi ha canvis importants, juntament amb les característiques representatives d'aquests intervals o instants, és una manera natural de descriure els fets.

3.1.5 Un exemple de motivació

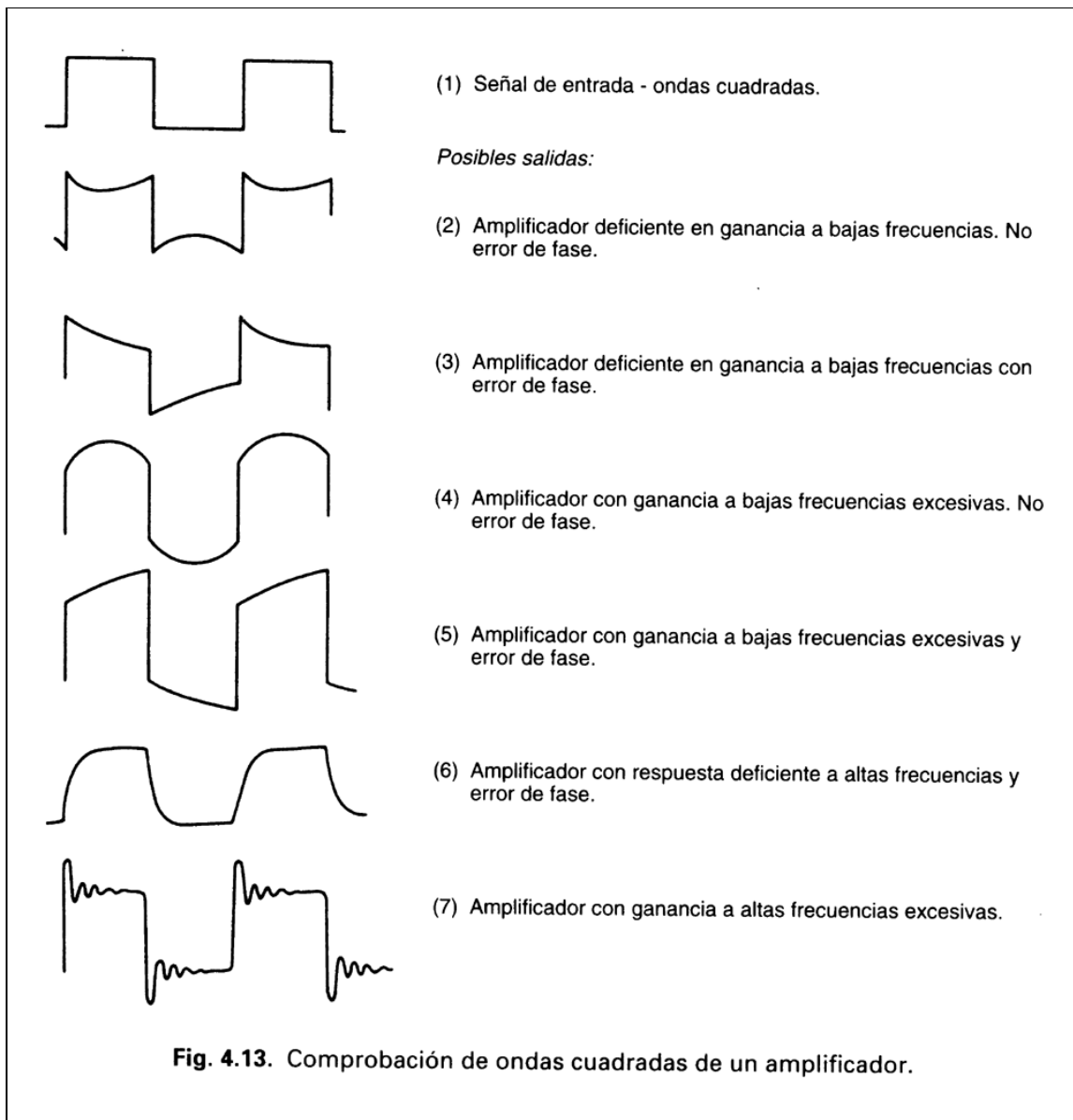


Fig. 3-1 Relació entre la forma del senyal de sortida i les deficiències en un amplificador de baixa freqüència [61].

Com a exemple de la utilitat de la representació en episodis, es presenta un cas en què la 'forma' dels senyals s'utilitza per diagnosticar fallades. En aquest cas, presentat en un llibre sobre diagnòstic d'avaries en electrònica destinat a tècnics [61], es relacionen les possibles fallades que poden afectar circuits amplificadors amb les possibles respostes a un senyal de prova. Exemples semblants es poden trobar en llibres o manuals de reparació dedicats a altres sistemes (aparells de TV [74], vídeo [43], alternadors per automòbils [77]...).

En les figures Fig. 3-1 i Fig. 3-2 es pot veure com diferents respostes a un senyal d'entrada són indicadors dels diferents problemes que poden afectar el circuit amplificador. Cada possible resposta està relacionada amb una fallada, descrita de manera que és possible localitzar-la en diferents parts o components del circuit.

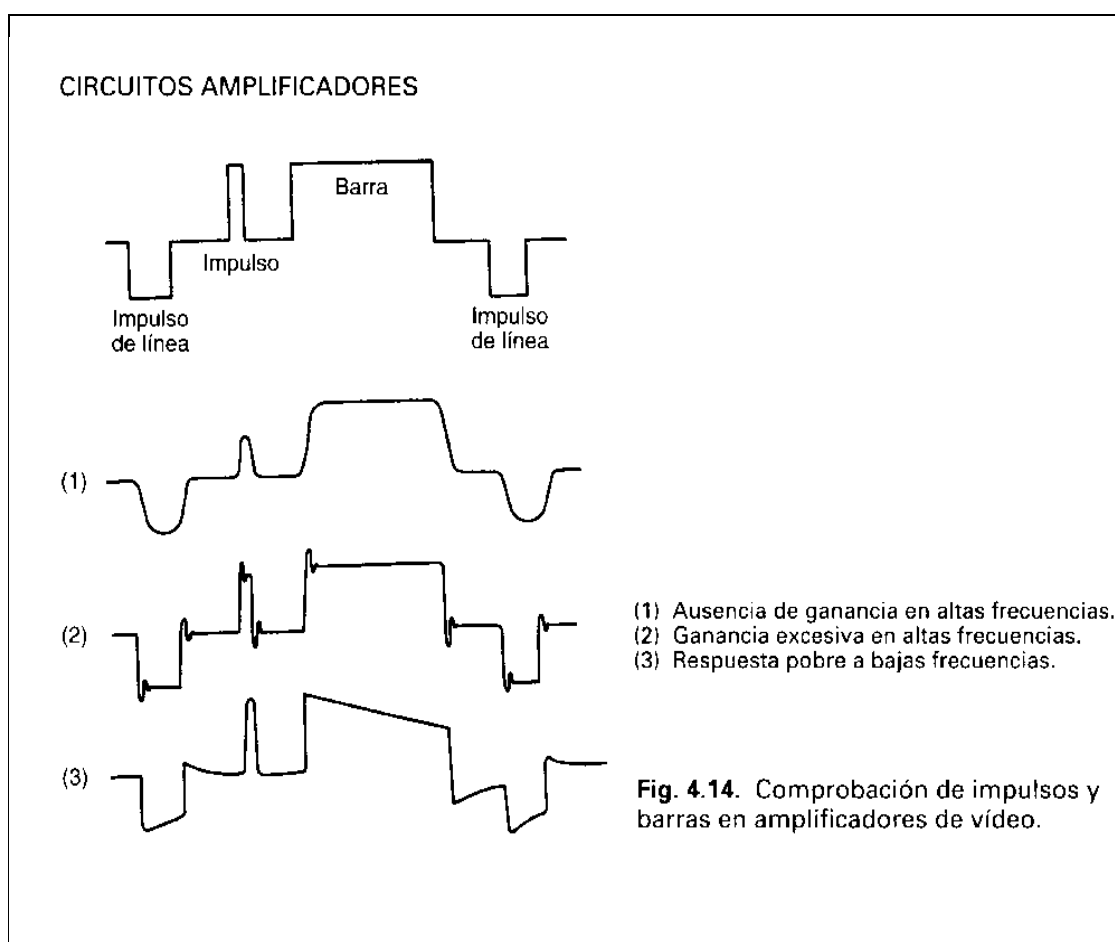


Fig. 3-2 Relació entre la forma del senyal de sortida i les deficiències en un amplificador de banda ampla [61].

Per poder utilitzar aquesta mena de coneixements en un sistema de Supervisió experta de processos, es disposa de Taules, Sistemes Experts, Arbres de Decisió o altres mètodes de representació del coneixement. Però, en qualsevol cas, cal una descripció dels senyals que sigui prou concisa i alhora prou expressiva per tal de fer possible, o facilitar, la utilització d'aquests mètodes.

3.2 La representació dels senyals en Episodis

El concepte general d'episodi va ser introduït en el camp de la IA en l'àrea del Raonament Qualitatiu. Williams [92] dóna una definició general d'episodi com un conjunt de dos elements:

- un interval de temps, anomenat l'**extensió temporal** de l'episodi
- un **context qualitatiu** que dóna significat a interval de temps

Aquesta definició general permet definir un episodi tant explícitament com explícit sigui el seu context qualitatiu. Per exemple, si es defineix l'estat estacionari com a context qualitatiu, qualsevol interval de temps on el comportament sigui d'estat estacionari serà un 'episodi d'estat estacionari'. En funció de les aplicacions poden ser definits diversos contextos qualitatius. En Control, per exemple: resposta de primer ordre, resposta oscil·latòria ... ; en Detecció de fallades: fora de rang, funcionament normal ... ; o en monitorització: creixement, decreixement,...

En el mateix treball es defineix la història d'una variable com la descripció del comportament d'una variable al llarg del temps. La història d'una variable consisteix en una seqüència d'episodis contigus.

A [11] es pot trobar una formalització de la representació dels senyals en episodis basada en el concepte de tendència com a seqüència d'episodis caracteritzats qualitativament pels signes del senyal i de la primera i segona derivades. Aquesta formalització, descrita en la secció 3.3, té una extensió pràctica en la Representació Triangular de Tendències que es descriu en la secció 3.4.

En les seccions següents es mostren, a més de la formalització de la representació en episodis, quatre aproximacions on, a més del context qualitatiu s'utilitza informació quantitativa que permet una descripció més expressiva dels senyals i, per tant, una aplicabilitat més gran de les representacions.

3.3 Formalització. Representació qualitativa de tendències [11]

3.3.1 Representació del temps

Per representar i raonar amb representacions temporals és necessari tenir una representació explícita i concisa del temps. Quan es treballa amb senyals mostrejats, el temps es representa d'una manera natural com una seqüència lineal i estrictament creixent d'instantis:

$$t = \{t_{-\infty} \dots t_i \dots t_j \dots t_{\infty}\} \quad \text{on} \quad t_i < t_j \Leftrightarrow i < j$$

Per mantenir la noció de continuïtat en el temps, es defineix un interval temporal com un interval obert I de la següent manera:

$$I_{ij} = (t_i, t_j) \quad \text{on} \quad t_i < t_j$$

Aleshores, el temps es pot representar com una seqüència de intervals oberts separats per instants; o bé, si es considera un instant com un interval de durada zero, com una seqüència d'intervals temporals.

3.3.2 Representació qualitativa

- **Estat qualitatiu:** L'estat qualitatiu d'una variable $x:[a,b] \rightarrow \mathcal{R}$, per $t \in [a,b]$ es defineix com un triplet de valors qualitatius de la següent manera:

$$QS(x, t) = \begin{cases} \text{indefinit} & \text{si } x \text{ és discontinua a } t \\ \langle [x(t)], [dx(t)], [ddx(t)] \rangle & \text{en cas contrari} \end{cases}$$

on:

$$[x(t)] = \begin{cases} + & \text{si } x(t) > 0 \\ 0 & \text{si } x(t) = 0 \\ - & \text{si } x(t) < 0 \end{cases}$$

$$[dx(t)] = \begin{cases} + & \text{si } x'(t) > 0 \\ 0 & \text{si } x'(t) = 0 \\ - & \text{si } x'(t) < 0 \end{cases}$$

$$[ddx(t)] = \begin{cases} + & \text{si } x''(t) > 0 \\ 0 & \text{si } x''(t) = 0 \\ - & \text{si } x''(t) < 0 \end{cases}$$

- **Tendència qualitativa:** La tendència d'una variable $x:[a,b] \rightarrow \mathcal{R}$ es representa qualitativament mitjançant la seqüència contínua d'estats qualitatius a $[a,b]$. Aquesta definició fa necessària la construcció d'aquesta seqüència. Per a la seva construcció cal determinar intervals temporals on l'estat qualitatiu de la variable sigui constant i els instants on canvia.
- **Episodi:** Un episodi d'una variable $x:[a,b] \rightarrow \mathcal{R}$ es defineix per qualsevol interval temporal $(t_i, t_j) \subset [a,b]$ on $QS(x,t)$ és constant $\forall t \in (t_i, t_j)$ com el parell:

$$\langle t\text{-extensió}, QS(x, t_i, t_j) \rangle$$

definit de la següent manera:

- a) extensió temporal de l'episodi: $t\text{-extensió} = (t_i, t_j)$
- b) estat qualitatiu de x a (t_i, t_j) : $QS(x, t_i, t_j) = QS(x, t) \forall t \in (t_i, t_j)$

D'aquesta manera, un episodi representa un interval de comportament uniforme on totes les propietats qualitatives ($[x], [dx], [ddx]$) de la variable romanen constants.

- **Història qualitativa:** Per una variable $x:[a,b] \rightarrow \mathcal{R}$ i una seqüència estrictament creixent d'instants temporals $T = \{a=t_0, \dots, t_j, \dots, t_n=b\}$ de manera que entre cada parell

d'instants adjacents de T es pot definir un episodi. Una història qualitativa de x a T es defineix com la seqüència d'episodis, alternant instants i intervals temporals de la següent manera:

$$QS(x, t_0), QS(x, t_0, t_1), QS(x, t_1), \dots QS(x, t_{n-1}, t_n), QS(x, t_n)$$

- **Episodi maximal:** Un episodi e_1 és maximal si no hi ha cap episodi e_2 que:
 - a) e_1 i e_2 tinguin el mateix estat qualitatiu, i
 - b) extensió temporal de $e_1 \subset$ extensió temporal de e_2
- **Historia qualitativa concisa:** Una historia qualitativa és concisa si tots els episodis són maximals.
- **Instant temporal geomètricament distingit:** Per una variable $x: [a, b] \rightarrow \mathcal{R}$, ho són, a més de a i b , tots els elements $t \in (a, b)$ en què es compleix alguna d'aquestes condicions:
 - a) $x(t)$ té una discontinuïtat C_0 (en el valor) o C_1 (en la derivada) ;
 - b) $x(t)=0$;
 - c) $x'(t)=0$;
 - d) $x''(t)=0$;

D'aquesta manera, l'extensió temporal dels *episodis maximals* ha d'estar sempre entre dos instants temporals geomètricament distingits.

A partir d'aquestes definicions que constitueixen, bàsicament, la formalització de la Representació Qualitativa de Tendències, es proposa una extensió que permet la incorporació dels coneixements específics sobre les variables representades. Aquesta extensió es fa afegint alguns conceptes que, respectant la formalització anterior, permeten tenir en compte altres consideracions a més de les purament abstractes o geomètriques.

- **Valor important en el domini:** Per una variable $x: [a, b] \rightarrow \mathcal{R}$ els *valors importants en el domini* són aquells valors de $x(t)$ o $x'(t)$ que resulten interessants pel coneixement que es té de la variable i del domini en què es mou. En aquesta definició, s'hi poden incloure les alarmes, consignes ...
- **Instant temporal distingit en el domini:** Per una variable $x: [a, b] \rightarrow \mathcal{R}$, són els elements del conjunt:

$$\{ t \in (a, b) \mid x(t) \text{ o } x'(t) \text{ són valors importants en el domini} \}$$

L'extensió pràctica de la formalització descrita en aquest apartat són les representacions triangular i trapezoïdal.

3.4 Representacions triangular i trapezoïdal [4, 5, 11]

La representació triangular de tendències és l'extensió pràctica de la formalització descrita en la secció anterior. Les característiques més importants d'aquesta representació són que conserva una part de informació quantitativa i que permet una representació a diferents resolucions. Consisteix en una divisió del senyal en episodis triangulars. Donat un interval de temps (t_i, t_j) un **episodi triangular** està definit pel conjunt de valors següent:

$$\langle [\partial\partial x], (t_i, t_j), \langle x(t_i), x'(t_i) \rangle, \langle x(t_j), x'(t_j) \rangle \rangle$$

on

$$[\partial\partial x] = \begin{cases} + & \text{si } x'' > 0 \\ 0 & \text{si } x'' = 0 \\ - & \text{si } x'' < 0 \end{cases} \quad \text{és constant a tot l'episodi}$$

Amb aquesta representació, podem definir un triangle per a cada episodi en el qual els costats vénen determinats per la recta que uneix els dos punts $(t_i, x(t_i))$ i $(t_j, x(t_j))$ i les tangents en aquests dos punts.

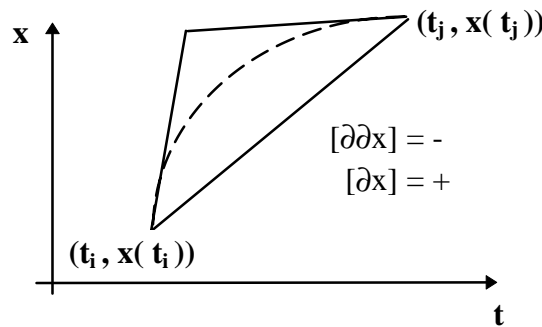


Fig. 3-3 Construcció d'un episodi triangular.

D'aquesta manera, es pot representar l'evolució d'un senyal durant un determinat interval de temps com una successió d'episodis triangulars. Els punts que delimiten aquests episodis són els màxims, mínims i punts d'inflexió; els episodis es caracteritzaran per la constància de $[\partial\partial x]$ i de $[\partial x]$ i en total hi poden haver 7 tipus de triangles.

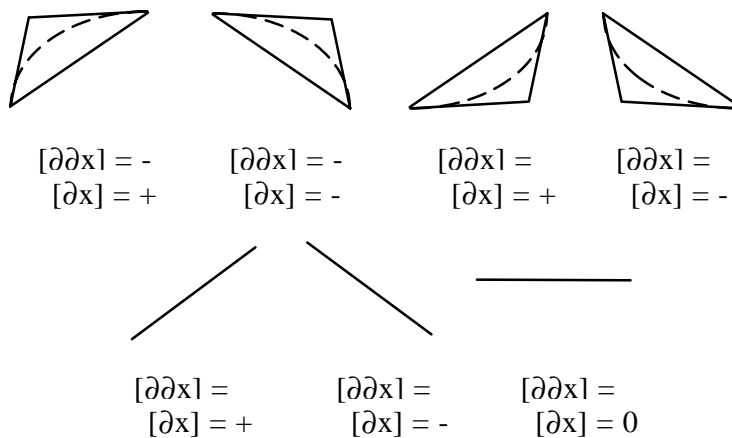


Fig. 3-4 Tipus d'episodis triangulars.

Així doncs, la representació triangular de tendències consisteix en una successió temporal de triangles de diferents tipus. A partir d'aquesta representació es pot fer un estudi de les tendències amb diferents resolucions, augmentant l'escala d'observació. Això es fa a partir dels episodis trapezoïdals. Un **episodi trapezoïdal** està definit de la mateixa manera que un episodi triangular, però amb un punt afegit; en aquest punt, anomenat punt de convexitat, la derivada és igual al pendent mitjà de l'episodi. Prenent la tangent en aquest punt i el triangle que defineix l'episodi triangular, es pot construir el trapezi que defineix l'episodi trapezoïdal.

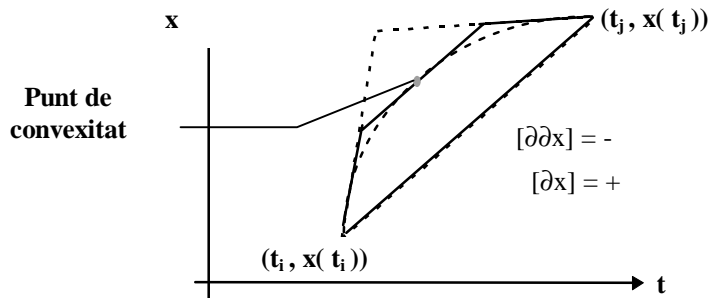


Fig. 3-5 Construcció d'un episodi trapezoïdal.

Una segona manera de construir episodis trapezoïdals, utilitzada per fer la representació a diferents escales temporals, es fa a partir dels episodis triangulars o d'altres episodis trapezoïdals.

- a partir d'episodis triangulars: es construeixen els trapezis a partir de triangles consecutius amb el mateix valor de $[\partial\partial x]$; d'aquesta manera, els episodis trapezoïdals estaran caracteritzats per la constància de $[\partial\partial x]$. Per tant, només n'hi pot haver de dos tipus:

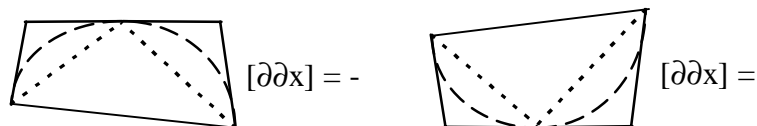


Fig. 3-6 Tipus d'episodis trapezoïdals.

- a partir d'una representació anterior en episodis trapezoïdals: a partir d'una representació inicial s'agrupen sèries de trapezis contigus en un sol trapezi, que d'aquesta manera dona lloc a una representació del senyal a una escala més gran.

El resultat del procés d'escalament a partir del senyal original és el que es pot veure en les figures Fig. 3-7 i Fig. 3-8

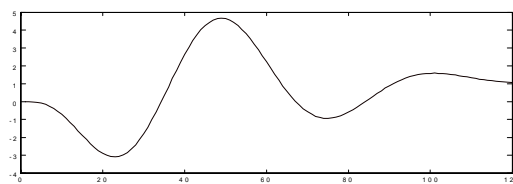


Fig. 3-7 Senyal original.

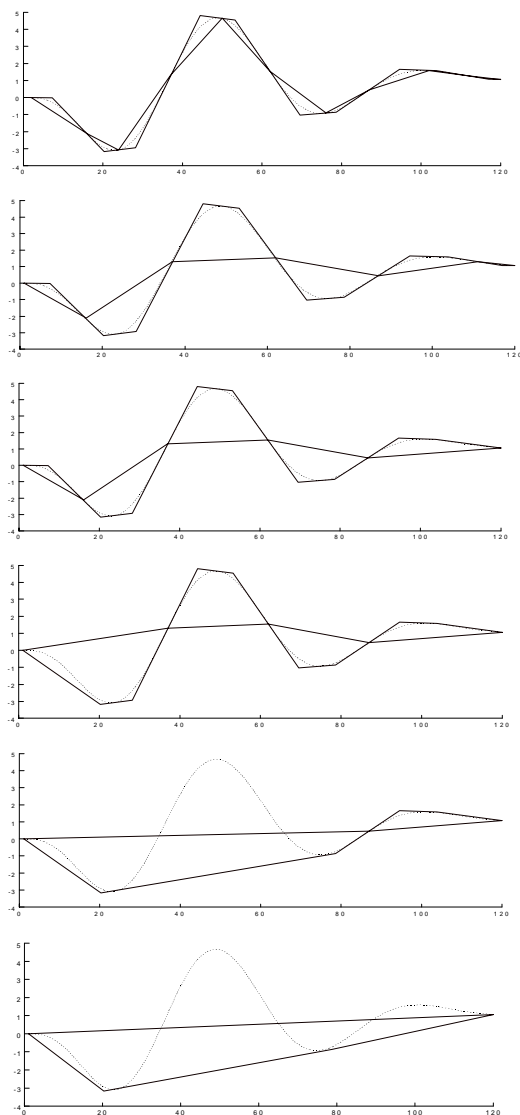


Fig. 3-8 Representació en diverses escales del senyal de la Fig. 3-7.

Una altra representació triangular molt semblant a l'anterior es pot trobar a [5]. En aquest cas, els episodis triangulars es construeixen seguint el mètode anterior, però el conjunt de triangles s'amplia distingint entre diferents tipus segons el signe de la derivada en els extrems de l'episodi. En aquesta aproximació també es construeixen episodis trapezoïdals que permeten obtenir representacions d'un mateix senyal a diverses escales. En aquest cas els episodis trapezoïdals es caracteritzen per la constància d'un dels valors qualitius $[\partial x]$ o $[\partial \partial x]$, i es construeixen agrupant dos episodis triangulars consecutius.

Les representacions trapezoïdals aquí descrites han estat utilitzades en la Supervisió de processos biològics o químics (*batch*), on la representació dels senyals es fa fora de línia. En aquests casos la representació s'obté a partir de senyals prèviament emmagatzemats [5][7].

3.5 Llenguatge de Descripció de Tendències (TDL)

Janunsz i Venkatasubramanian [50] proposen una descripció qualitativa que consta de quatre elements principals: **primitives**, **episodis**, **tendències** i **perfils**. El conjunt de primitives es basa en una qualificació de la primera i segona derivades del senyal, que poden prendre tres valors: positiu, zero o negatiu. Per tant, el conjunt de primitives està format per 9 elements, representats en la Fig. 3-9.

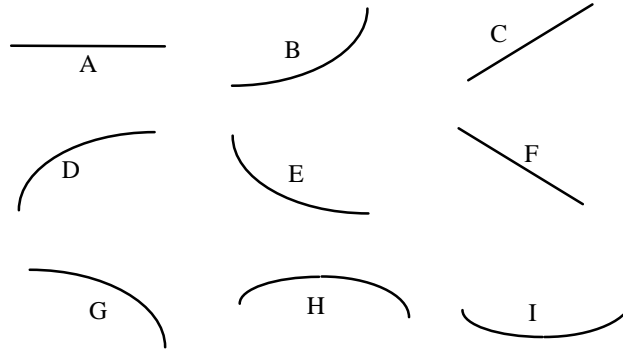


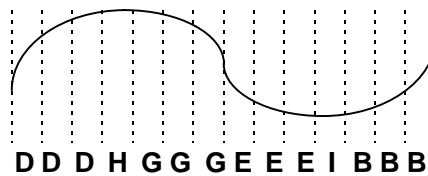
Fig. 3-9 Conjunt de primitives

El primer pas per a obtenir el perfil del senyal és l'obtenció de les primitives, a cada instant de mostratge s'identifica la primitiva del senyal a partir de la primera i segona derivades (Fig. 3-10b). El següent pas és la combinació de primitives per generar episodis; els intervals consecutius amb la mateixa primitiva s'agrupen per formar episodis (Fig. 3-10c), de manera que cada episodi estarà caracteritzat per una primitiva i la durada temporal. La tendència del senyal consisteix en la successió d'episodis que el formen, i, finalment, el perfil s'obté a partir de la tendència enriquint-la amb informació quantitativa consistent en el valor del senyal en els extrems dels episodis.

a) Senyal original :



b) Primitives :



c) Episodis :

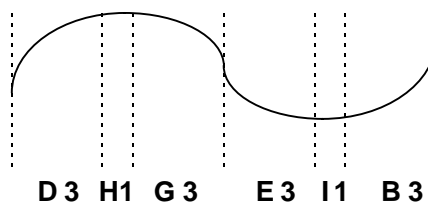


Fig. 3-10 Obtenció d'episodis.

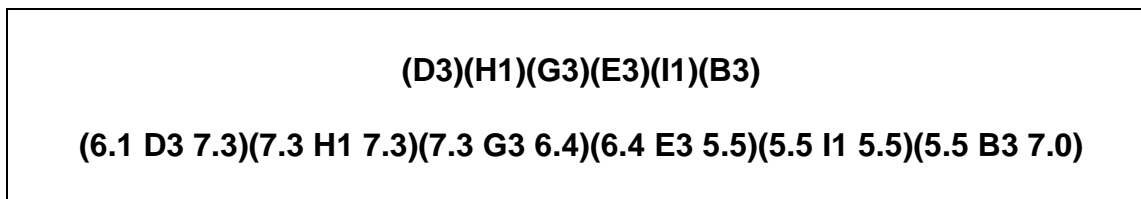


Fig. 3-11 Tendència i perfil del senyal de la Fig. 3-10.

En aquesta representació la informació quantitativa utilitzada és la durada i el valor del senyal en els extrems dels episodis. Aquesta informació es pot considerar com la mínima per poder obtenir una representació prou completa, que no es podria aconseguir només amb la informació qualitativa.

Aquesta representació va acompanyada d'un codi de correcció d'errors (**ECC**, *Error Correcting Code*) [82, 83] encarregat de postprocessar la representació per corregir les incongruències degudes al soroll o a les discontinuïtats en el senyal.

3.6 Anàlisi qualitativa de perfils temporals

Konstantinov i Yoshida [54] proposen una representació semblant a l'anterior amb algunes diferències. En aquest cas, la representació no es fa a partir de primitives, sinó que el primer pas consisteix a obtenir, a partir del senyal original en un determinat interval de temps, dues seqüències **sd1** i **sd2** que representen l'evolució dels signes de la primera i segona derivades en aquest interval temporal:

$$\begin{aligned} SD1(x(t)) &= sd1 = (+, -, \dots) \\ SD2(x(t)) &= sd2 = (+, -, \dots) \\ & t \in [t1, t2] \end{aligned}$$

Aleshores, el perfil qualitatiu (**qshape**) de la variable en l'interval temporal s'expressa mitjançant la combinació d'aquestes dues seqüències:

$$qshape[x(t)] = \{ SD1(x(t)), SD2(x(t)) \} = \{ (+, -, \dots); (+, -, \dots) \} \quad t \in [t1, t2]$$

obtenint, d'aquesta manera, una primera representació qualitativa del senyal. Es considera que la forma de dues variables és igual si els dos perfils qualitius (**qshapes**) coincideixen.

Els següent pas és la identificació del perfil obtingut amb alguna de les formes que formen una llibreria expansible on hi ha definides un conjunt de formes possibles en termes de perfils qualitius (Fig. 3-12).

Aquesta llibreria, a diferència de la representació anterior, no representa un conjunt mínim de formes primitives, sinó que hi ha formes 'compostes' que permeten descriure completament dinàmiques concretes (comença a créixer, decreixement còncav-convex...). Això provoca que la mida d'aquesta llibreria pugui arribar a ser molt gran, ja que es pot ampliar en funció de les necessitats, però al mateix temps facilita el reconeixement de formes complexes.

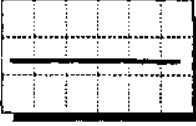
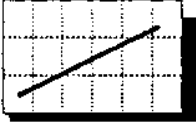
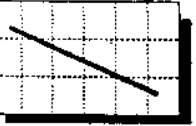
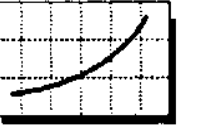
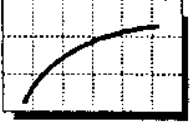
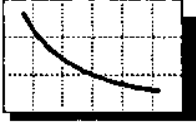
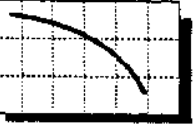
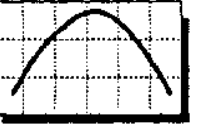

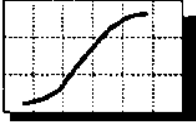
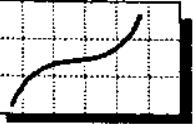
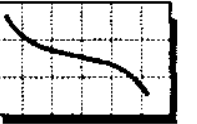
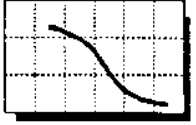
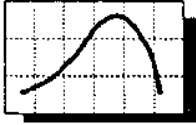
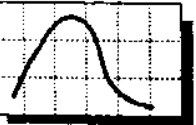
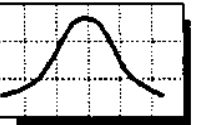
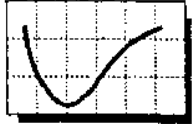
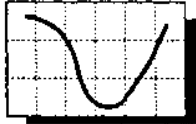
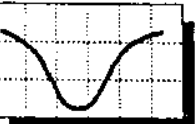

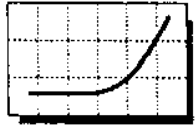
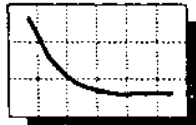
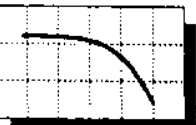
| | | | |
|--|--|--|--|
| <p>Constant</p>  <p>$sd1^L = (0); sd2^L = (x)$</p> | <p>Increasing</p>  <p>$sd1^L = (+); sd2^L = (x)$</p> | <p>Decreasing</p>  <p>$sd1^L = (-); sd2^L = (x)$</p> | <p>IncreasingConcavely</p>  <p>$sd1^L = (+); sd2^L = (+)$</p> |
| <p>IncreasingConvexly</p>  <p>$sd1^L = (+); sd2^L = (-)$</p> | <p>DecreasingConcavely</p>  <p>$sd1^L = (-); sd2^L = (+)$</p> | <p>DecreasingConvexly</p>  <p>$sd1^L = (-); sd2^L = (-)$</p> | <p>PassedOverMaximum</p>  <p>$sd1^L = (+,-); sd2^L = (x)$</p> |
| <p>PassedOverMinimum</p>  <p>$sd1^L = (-,+); sd2^L = (x)$</p> | <p>IncreasingConcavelyConvexly</p>  <p>$sd1^L = (+); sd2^L = (+,-)$</p> | <p>IncreasingConvexlyConvexly</p>  <p>$sd1^L = (+); sd2^L = (-,+)$</p> | <p>DecreasingConcavelyConvexly</p>  <p>$sd1^L = (-); sd2^L = (+,-)$</p> |
| <p>DecreasingConvexlyConcavely</p>  <p>$sd1^L = (-); sd2^L = (-,+)$</p> | <p>ConcaveMaximum</p>  <p>$sd1^L = (+,-); sd2^L = (+,-)$</p> | <p>MaximumConcave</p>  <p>$sd1^L = (+,-); sd2^L = (-,+)$</p> | <p>ConcaveMaximumConcave</p>  <p>$sd1^L = (+,-); sd2^L = (+,-,+)$</p> |
| <p>MinimumConvex</p>  <p>$sd1^L = (-,+); sd2^L = (+,-)$</p> | <p>ConvexMinimum</p>  <p>$sd1^L = (-,+); sd2^L = (-,+)$</p> | <p>ConvexMinimumConvex</p>  <p>$sd1^L = (-,+); sd2^L = (-,+,-)$</p> | <p>StoppedToIncrease *</p>  <p>$sd1^L = (+,0); sd2^L = (x)$</p> |
| <p>StartedToIncrease *</p>  <p>$sd1^L = (0,+); sd2^L = (x)$</p> | <p>StoppedToDecrease *</p>  <p>$sd1^L = (-,0); sd2^L = (x)$</p> | <p>StartedToDecrease *</p>  <p>$sd1^L = (0,-); sd2^L = (x)$</p> | <p>...</p> |

Fig. 3-12 Elements de la llibreria expansible. Cada forma és guardada de manera simbòlica mitjançant les seqüències $sd1$ i $sd2$ [54].

Aquesta metodologia representa alguns avantatges respecte de les anteriors en el sentit que facilita la detecció de formes concretes en un interval de temps. Però, en canvi, cal determinar prèviament l'interval de temps, i no dóna com a resultat una representació única dels senyals.

3.7 Representació qualitativa/quantitativa de senyals

Una altra aproximació a la utilització d'episodis per representar els senyals que provenen dels processos es pot trobar a [13, 16] on apareix una extensió del conjunt d'episodis. En aquest cas, el rang de valors de la segona derivada es divideix en tres intervals (*negatiu, zero i positiu*) als quals s'assigna un valor qualitatiu ($[\partial\partial x]$). $[\partial\partial x]$ ='zero' representa un interval en comptes d'ésser un valor numèric; els límits d'aquest interval 'zero' s'han d'escollir d'acord amb la dinàmica del senyal que es representa i de la utilitat que es vol per a la representació.

En aquest cas, els episodis es caracteritzen només pel valor qualitatiu de la segona derivada ; els **dtp** (*distinguished time points*) es detecten només quan hi ha un canvi en aquest valor qualitatiu, i els episodis es construeixen entre aquests dtp. Un cop determinats els episodis, aquests es classifiquen tenint en compte altres característiques qualitatives; al mateix temps que la informació numèrica dels dtp (instant de temps i valor del senyal i de la derivada) s'aprofita per a obtenir altres característiques (numèriques) de l'episodi. Com en els altres casos, la informació qualitativa és enriquida per informació quantitativa.

- **Informació qualitativa: tipus d'episodis.** Tenint en compte que el episodis es caracteritzen per $[\partial\partial x]$, amb tres valors possibles, hi ha tres tipus bàsics d'episodis: ($[\partial\partial x]$ =negatiu, $[\partial\partial x]$ =zero, $[\partial\partial x]$ =positiu). Però el conjunt d'episodis s'amplia utilitzant el pendent de la recta que uneix els extrems de l'episodi. Aquest pendent es qualifica en tres valors (positiu, zero i negatiu) i s'anomena $[\partial x]$ per analogia amb la representació triangular, ja que conserva el mateix significat per l'episodi encara que no pel senyal. Per tant, d'acord amb $[\partial x]$ i $[\partial\partial x]$, hi ha nou possibles tipus d'episodis (3 valors de $[\partial\partial x]$ x 3 valors de $[\partial x]$). A més, és útil distingir més tipus quan $[\partial x]$ i $[\partial\partial x]$ són diferents de 'zero' en funció dels pendents inicial i final de l'episodi, que són qualificats igualment que $[\partial x]$. El conjunt final d'episodis, obtingut a partir d'aquestes consideracions, consta de 13 tipus diferents (Fig. 3-13) que serveixen per descriure qualitativament qualsevol senyal.

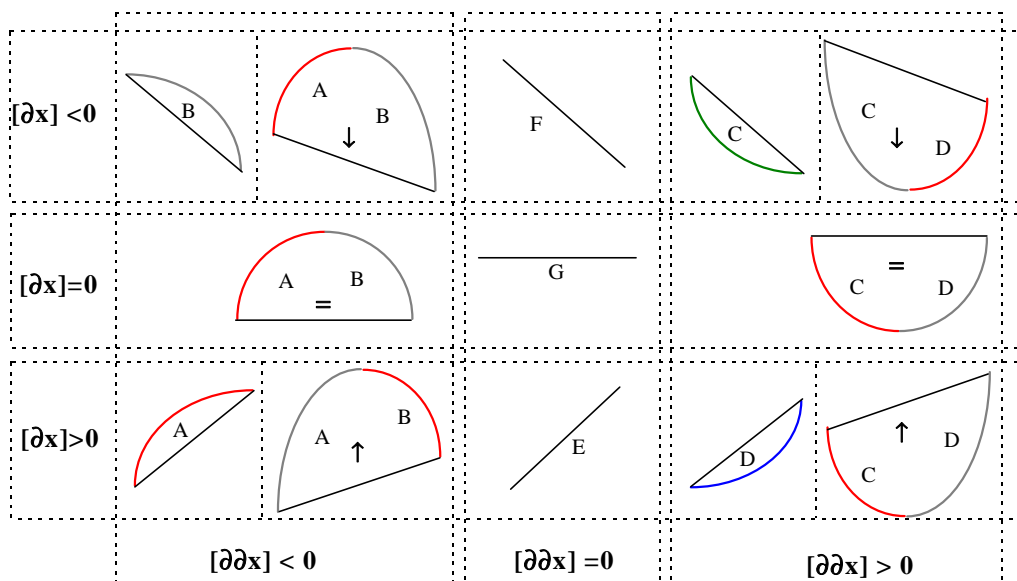


Fig. 3-13 Tipus d'episodis.

- **Informació quantitativa.** La informació numèrica de la qual es pot disposar fàcilment és la que s'obté dels dtp. Cada episodi està limitat per dos dtp, l'esquerra i el dret, dels quals es coneix l'instant de temps, el valor del senyal i la derivada en cada un:

$$\text{esquerra: } [n_l, x(n_l), dx(n_l)]$$

$$\text{dret: } [n_r, x(n_r), dx(n_r)]$$

Aquests sis paràmetres no donen directament cap informació significativa, però es poden utilitzar per obtenir altres dades qualitatives o quantitatives d'interès. Les qualitatives ja s'han vist en el punt anterior i serveixen per definir els diferents tipus possibles. Les dades quantitatives poden ser molt variades i el seu interès depèn de l'aplicació final de la representació i de les característiques representatives del senyal.

3.8 Conclusions

En aquest capítol s'han analitzat les possibilitats, la formalització i diverses aproximacions de la representació dels senyals basada en episodis.

Respecte a les possibilitats, es pot dir que la representació dels senyals basada en episodis respon a les necessitats dels sistemes de Supervisió pel que fa a:

- la representació dels senyals tant des del punt de vista temporal com de qualificació
- la representació del coneixement expert sobre els senyals

D'altra banda, s'ha constatat que tant la formalització com les diferents aproximacions existents descriuen qualitativament els senyals a partir de la primera i segona derivades. Els episodis es construeixen a partir dels canvis significatius en aquestes dues característiques.

Però també s'ha constatat que la primera definició d'episodi és més general i permet tenir en compte altres característiques que no les purament geomètriques. A més, en les aproximacions descrites es consideren els canvis de signe canvis significatius, però pot haver-n'hi d'altres que siguin tant o més importants.

Totes aquestes consideracions suggereixen la possibilitat de representar els senyals tenint en compte altres aspectes. En els capítols següents es presenta una formalització més general de les representacions en episodis que permet tenir en compte aquests altres aspectes. Així mateix es presenta una altra aproximació basada en la nova formalització.

4. GENERALITZACIÓ DE LA REPRESENTACIÓ EN EPISODIS

4.1 Necessitat i utilitat d'una generalització.

Les diverses representacions en episodis descrites en el capítol anterior es basen en l'estudi de dues característiques qualitatives com són els signes de la primera i de la segona derivada, a les quals podem anomenar *tendència* i *curvatura*, respectivament. La tendència i la curvatura serveixen per descriure qualitativament i simplificadament la dinàmica dels senyals. Al mateix temps, els instants en què es produeixen canvis significatius relatius a aquestes característiques poden aportar la informació numèrica suficient per completar la informació qualitativa.

Però pot ser que la tendència i la curvatura no siguin suficients o necessàries per descriure qualitativament les característiques d'interès del senyal que estem estudiant. O que només alguna d'aquestes dades sigui necessària, com en el cas de la representació trapezoïdal, en què només s'utilitza la curvatura. En molts casos pot passar que la pròpia dinàmica dels senyals no porti informacions significatives per a la Supervisió, però que en canvi altres característiques (com el nivell de soroll, l'ultrapassament d'un llinard, la desviació respecte d'un valor mitjà o l'espectre) siguin les necessàries per poder obtenir conclusions sobre el procés que s'ha supervisar. De fet, els mètodes analítics de Diagnosi o de Detecció de fallades es basen en l'estudi d'altres característiques dels senyals, i no únicament en la primera i segona derivades.

Per tant, una generalització de les representacions en episodis descrites anteriorment pot ser l'eina més adequada per a la finalitat que busquem, és a dir, per obtenir informació simbòlica i simplificada dels senyals. Si per construir els episodis s'utilitzen només les característiques dels senyal necessàries, és clar que la representació resultant serà al mateix temps la més simple, i la que aportarà la màxima informació, qualitativa i quantitativa, útil.

Aquesta generalització es pot fer formalment a partir de la definició d'episodi expressada en la secció 3.2 i basada en la formalització de Cheung i Stephanopoulos resumida en la secció 3.3.

4.2 Representació del temps i del senyal.

El punt de partida de la representació d'un senyal basada en episodis ha de ser el propi senyal. Per tant, suposant que el senyal està mostrejat, es disposa dels instants de mostratge i del valor del senyal en aquests instants, que es poden representar d'una manera ordenada i natural:

$$\begin{aligned} & \{t_0, t_1, \dots, t_i\} \\ & \{x(t_0), x(t_1), \dots, x(t_i)\} \\ & t_i < t_j \Leftrightarrow i < j \end{aligned}$$

A partir d'aquesta representació inicial es poden definir les qualificacions necessàries per obtenir la representació final en episodis.

4.3 Funció característica.

Per **funció característica** s'entén aquella característica quantitativa del senyal que ens interessarà estudiar i que anirà variant al llarg del temps. La funció característica és la base de la representació en episodis i pot ser qualsevol funció dels valors senyal i dels instants de temps en què hem mesurat aquest senyal. El valor de la funció característica en un determinat instant de temps pot dependre dels valors del senyal en l'instant de mostratge actual i anteriors, dels valors de la funció característica en els instants de mostratge anteriors i dels valors del temps en els instants de mostratge.

$$F(t_i) = f(x(t_0), x(t_1), \dots, x(t_i), F(t_0), F(t_1), \dots, F(t_{i-1}), t_0, t_1, \dots, t_i)$$

Alguns exemples de funció característica poden ser:

- El propi valor del senyal

$$F(t_i) = x(t_i)$$

- Derivada del senyal

$$F(t_i) = (x(t_i) - x(t_{i-1})) / (t_i - t_{i-1})$$

- Filtrat FIR o IIR del senyal

$$\begin{aligned} & F(t_i) = b_0x(t_i) + b_1x(t_{i-1}) + \dots + b_{nb}x(t_{i-nb}) \\ & F(t_i) = b_0x(t_i) + b_1x(t_{i-1}) + \dots + b_{nb}x(t_{i-nb}) - a_1F(t_{i-1}) - \dots - a_{na}F(t_{i-na}) \end{aligned}$$

- Transformades del senyal (FFT, Transformada Wavelet ...), la Transformada Wavelet ja ha estat utilitzada en combinació amb la representació trapezoidal en l'estudi de processos 'batch' [6,7]. Aquesta transformada és una descomposició temporal i freqüencial dels senyals i permet separar els comportaments dels senyals deguts als diversos components que el poden afectar (soroll, oscil·lacions, salts...)[62]
- Nivell de soroll en el senyal
- Espectre del senyal
- ...

Per tant, existeixen infinites possibilitats per triar la funció característica. Aquesta tria sempre ha d'estar en funció de les característiques que interressi estudiar o representar del senyal, que normalment estaran en funció del tipus del procés que s'hagi de supervisar i de les tasques del Sistema de Supervisió.

Pot ser necessari utilitzar més d'una funció característica per descriure tot allò que volem abstraure del senyal. Per tant, pot ser possible necessitar més d'una funció característica per cada senyal estudiat:

$$F_1(t_i), F_2(t_i), \dots, F_{n_f}(t_i)$$

Anomenem n_f al nombre de funcions característiques utilitzades.

Però cal tenir en compte que, com es veurà més endavant, el nombre de tipus diferents d'episodis està en funció del nombre de funcions característiques utilitzades per crear-los. Per tant, un excés de funcions característiques pot resultar contraproductiu, ja que aleshores el nivell d'abstracció dels resultats pot no ser suficient.

Per representar qualitativament un senyal cal definir-ne l'estat qualitatiu. Els diferents estats qualitius es poden definir a partir de les funcions característiques, assegurant d'aquesta manera que siguin representatius.

4.4 Interval·ls característics. Estat característic. Estat qualitatiu

Per obtenir estats qualitius a partir de les funcions característiques, només cal qualificar el valor de la funció característica. Cada funció característica pot prendre un rang de valors al llarg del temps que podem qualificar dividint el rang en interval·ls i assignant un valor qualitatiu a cada un d'aquests interval·ls. Això suposarà una qualificació en diferents nivells de la funció característica, que definiran els **estats característics** de cada funció característica. Cada estat característic indicarà la pertinença del valor de la funció característica a un interval que anomenarem **interval característic**. Per poder qualificar correctament un senyal, cal que la unió de tots els interval·ls característics sigui igual a tot el rang de valors que pot prendre la funció característica i que la intersecció de dos interval·ls característics qualsevol sigui el conjunt buit.

Si anomenem n_j al nombre d'interval·s característics de la funció característica F_j , podem definir:

$\{I_j^1, I_j^2, \dots, I_j^{n_j}\}$: conjunt dels interval·s característics de la funció característica F_j
 $\{S_j^1, S_j^2, \dots, S_j^{n_j}\}$: conjunt símbols representant cada interval característic
 $QF_j(t_i)$: Estat característic de la funció característica F_j a l' instant t_i

aleshores:

$QF_j(t_i) =$ valor qualitatiu de F_j a l' instant t_i

$$QF_j(t_i) = S_j^k \Leftrightarrow F_j(t_i) \in I_j^k$$

Per un interval de temps en que l'estat característic és constant es pot definir:

$QF_j(t_i, t_j)$: Estat característic de la funció característica F_j a l' interval (t_i, t_j)

$$QF_j(t_i, t_j) = S_j^k \Leftrightarrow F_j(t) \in I_j^k \quad \forall t \in [t_i, t_j)$$

Cada funció característica pot ser qualificada de diverses maneres, depenent sempre del tipus de procés que s'ha supervisar i de les tasques del Sistema de Supervisió. La qualificació més simple és en dos interval·s, dividint el rang de valors en positius i negatius, però podem incloure un interval al voltant del zero, interval·s al voltant de determinats valors significatius o interval·s per valors més grans i més petits que aquests valors significatius.

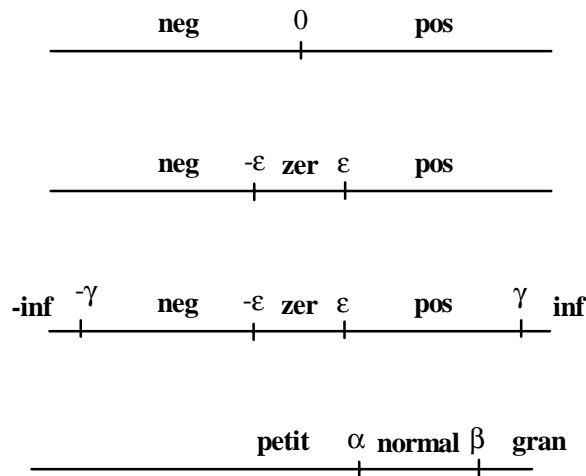


Fig. 4-1 Diverses possibilitats d'interval·s característics i símbols associats a cadascun.

En aquest cas, les possibilitats també són infinites; però, com en el cas anterior de les funcions característiques, cal tenir en compte que el nombre de tipus diferents d'episodis també estarà en funció del nombre d'interval·s característics.

L'estat qualitatiu d'una variable en un instant de temps, representant qualitativament totes les característiques d'interès, quedarà definit pel conjunt d'estats característics de les diverses funcions característiques:

$$QS(x, t_i) = \langle QF_1(t_i), QF_2(t_i), \dots, QF_{n_f}(t_i) \rangle$$

L'estat qualitatiu d'una variable en un interval de temps serà aleshores:

$$QS(x, t_i, t_j) = \langle QF_1(t_i, t_j), QF_2(t_i, t_j), \dots, QF_{nf}(t_i, t_j) \rangle$$

Aquesta definició suposa una generalització del concepte d'estat qualitatiu, definit anteriorment com el conjunt de valors qualitatius (*positiu*, *zero* o *negatiu*) del senyal, la derivada i la segona derivada.

4.5 Instants característics

Per obtenir una representació en episodis cal una divisió del temps en intervals significatius que ha d'estar directament relacionada amb l'estat qualitatiu del senyal, de manera que cada episodi quedi caracteritzat per un sol estat qualitatiu, constant en tot l'episodi. Per aquest motiu, els instants que limiten els episodis han de quedar determinats pels canvis en l'estat qualitatiu.

Els instants en què es produeix algun canvi en l'estat qualitatiu del senyal, els anomenarem **instants característics**:

$$t_i \text{ és un instant característic de } x(t) \Leftrightarrow QS(x, t_i) \neq QS(x, t_{i-1})$$

Poden haver-hi diferents tipus d'instants característics depenent de la funció característica en què s'ha produït el canvi i de quin canvi s'ha produït. Per exemple, si la funció característica és la primera derivada i els valors qualitatius són *positiu* i *negatiu*, els punts característics podran ser *màxims* (si el canvi és de *positiu* a *negatiu*) o *mínims* (si el canvi és de *negatiu* a *positiu*).

4.6 Característiques fonamentals i auxiliars

Tot i que els episodis queden totalment determinats pels instants característics i per l'estat qualitatiu, pot haver-hi altres dades interessants des del punt de vista de la Supervisió que no sigui necessari tenir en compte per a la determinació dels episodis. Per tant, es pot distingir entre unes **característiques fonamentals** de l'episodi, que són els instants característics que el delimiten (que anomenarem t_l i t_r) i el seu estat qualitatiu ($QS(x, t)$), i unes altres característiques, anomenades **característiques auxiliars**, que aportaran informació suplementària. Exemples de característica auxiliar poden ser el '*convexity point*' en la Representació Trapezoïdal de [11] o els vèrtex dels triangles en la Representació Triangular. També entendrem com a característica auxiliar de l'episodi altres dades del senyal en els instants característics, per exemple els valors del senyal o de la derivada.

4.7 Episodis

Els episodis són el resultat final d'aquest procés d'abstracció. Recordem que un episodi ha d'estar definit per dos elements:

- **Un interval de temps, la durada de l'episodi.** Limitat per dos instants característic consecutius.
- **Un context qualitatiu,** donant significat a l'interval de temps. Aquest context qualitatiu ve donat per l'estat qualitatiu i serveix per distingir un episodi dels episodis veïns.

Un episodi E^k serà, doncs, un conjunt de valors qualitatius i numèrics que podrem agrupar en característiques fonamentals i característiques auxiliars

$$E^k = \langle t_l^k, QS^k, \{característiques auxiliars\}, t_r^k \rangle$$

amb les condicions:

$$\begin{aligned} t_r^k &= t_l^{k+1} \\ QS^k &= QS(x, t_l^k, t_r^k) \\ QS^k &\neq QS^{k+1} \end{aligned}$$

l'última condició es pot posar també es pot formular:

$$QF_j^k \neq QF_j^{k+1} \text{ per alguna } F_j$$

La qual cosa assegura que els episodis que formen una representació siguin maximals.

Finalment, la representació d'un senyal estarà formada, doncs, per una successió d'episodis:

$$E^1, E^2, E^3, \dots, E^{ne}$$

4.7.1 Tipus d'episodis. Classificació fonamental i classificació útil

Un episodi està qualitativament caracteritzat pels valors qualitatius de les funcions característiques; per tant, hi haurà tants tipus diferents d'episodis com el producte del nombre d'interval·ls característics per a cada funció característica.

$$\prod_{j=1}^{nf} n_j$$

Per tant, es pot establir una **classificació fonamental** en què cada tipus estigui determinat per l'estat qualitatiu de la variable, constant en tota l'extensió temporal de l'episodi.

Però aquesta classificació fonamental pot ser ampliada si tenim en compte les característiques auxiliars qualitatives (no pas les numèriques, òbviament, ja que una classificació només es pot fer a partir de dades qualitatives). Aleshores, cada tipus fonamental pot ser subdividit en *tipus auxiliars* per formar el que podem anomenar una **classificació útil**, en la qual estaran contemplades totes les característiques interessants des del punt de vista del procés i del Sistema de Supervisió.

4.8 Exemples.

En aquests exemples s'intenten interpretar esquemàticament les diverses representacions en episodis des del punt de vista de la generalització anteriorment explicada, identificant les funcions característiques, els intervals característics i obtenint-ne les classificacions fonamental i útil.

4.8.1 Representació triangular [11]

- Funcions característiques: primera i segona derivada (dx, ddx).
- Intervals característics: positiu i negatiu, el zero és només un punt que separa els dos intervals.
- Instants característics: màxims, mínims i punts d'inflexió.
- Classificació fonamental: en 7 tipus. Els tres corresponents a $ddx=0$ (incloent-hi el de $dx=0$) estan contemplats en la classificació, però en la seva aplicació no apareixen mai, ja que el zero és representat només per un punt, no per un interval.

| dx | neg | zer | pos |
|-------|-----|-----|-----|
| ddx | A | - | B |
| neg | F | G | E |
| zer | C | - | D |
| pos | | | |

Taula 4-1

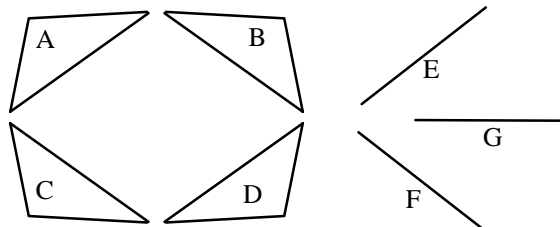


Fig. 4-2

- Característiques auxiliars: Com a característiques auxiliars numèriques es poden considerar totes aquelles dades necessàries per a la construcció dels triangles i els propis triangles. No es tenen en compte característiques auxiliars qualitatives, per tant, la classificació útil és la classificació fonamental.

4.8.2 Representació triangular [5]

- Funcions característiques: primera i segona derivada (dx, ddx).
- Intervals característics: positiu i negatiu, es contempla la possibilitat de l'interval característic zero, però no s'utilitza.
- Instants característics: màxims, mínims i punts d'inflexió.
- Classificació fonamental: en quatre tipus, en una primera classificació es contemplen els episodis amb $ddx=0$, però a la pràctica s'inclouen en els altres tipus.

| | dx | neg | pos |
|-----|----|-----|-----|
| ddx | | | |
| neg | | D | B |
| pos | | C | A |

Taula 4-2 Classificació fonamental.

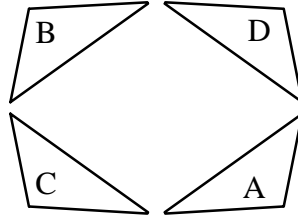


Fig. 4-3 Tipus d'episodis.

- Característiques auxiliars
 - Qualitatives: Es qualifica (neg,zer,pos) amb més precisió la derivada en alguns punts característics. Això fa que la classificació útil sigui diferent a la classificació fonamental.
 - Numèriques: Com a característiques auxiliar numèriques es poden considerar totes aquelles dades necessàries per a la construcció dels triangles i els propis triangles
- Classificació útil: la classificació útil té en compte la derivada en algun dels extrems dels episodis per tal de distingir entre els que comencen o acaben amb un extrem o un punt d'inflexió. Per exemple, en la Fig. 4-4 l'episodi D comença amb un màxim (dx=pos), i l'episodi D* comença amb un punt d'inflexió (dx=neg).

| | dx | neg | | pos | |
|-----|----|-----|----|-----|----|
| ddx | | | | | |
| neg | | D* | D | B* | B |
| pos | | C | C* | A | A* |

Taula 4-3 Classificació útil.

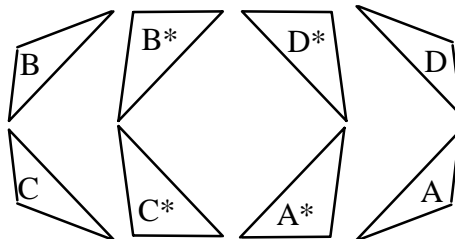


Fig. 4-4 Tipus d'episodis en la classificació útil.

4.8.3 TDL [82]

- Funcions característiques: primera i segona derivada(dx,ddx).
- Interval·s característics: positiu, zero i negatiu. En aquest cas el zero es considera un interval, fet que queda reflectit en la classificació fonamental.
- Instants característics: són els canvis d'interval característic, no es pot parlar rigurosament de màxims mínims o punts d'inflexió.
- Classificació fonamental: en nou tipus corresponents a totes les combinacions dels tres valors qualitatiu·s de la primera derivada i els tres de la segona.

| | dx | neg | zer | pos |
|-----|----|-----|-----|-----|
| ddx | | | | |
| neg | | G | H | D |
| zer | | F | A | C |
| pos | | E | I | E |

Taula 4-4 Classificació fonamental.

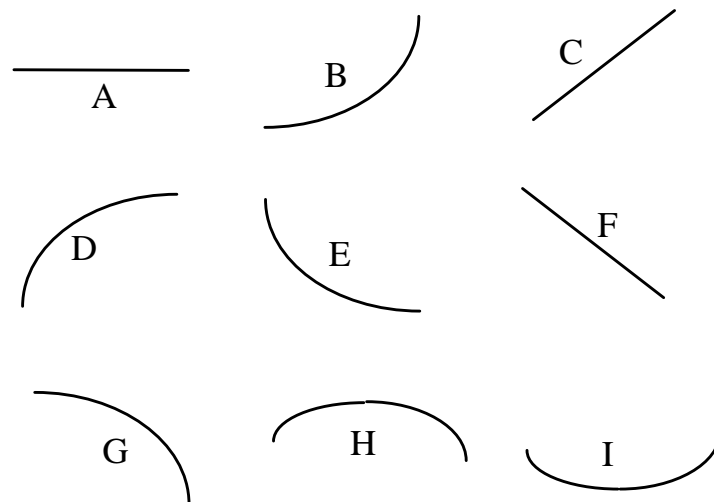


Fig. 4-5 Tipus d'episodis.

- Característiques auxiliars: No es tenen en compte característiques auxiliars qualitatives, per això la classificació útil és la classificació fonamental. Com a característiques auxiliars numèriques es té en compte, i s'utilitza, el valor del senyal en els punts característics. Aquesta informació numèrica complementa la qualitativa i serveix per reconèixer, per exemple, si en un senyal que està oscil·lant augmenta o disminueix l'amplitud de l'oscil·lació.

4.8.4 Representació trapezoïdal de Cheung i Stephanopoulos [11]

La representació trapezoïdal es pot construir a partir de la representació triangular, agrupant episodis triangular per construir nous episodis. Però també es pot considerar com una altra representació diferent.

- Funcions característiques: només la segona derivada (ddx).
- Interval·s característics: positiu i negatiu, el zero és només un punt que separa els dos interval·s.
- Instants característics: punts d'inflexió.
- Classificació fonamental: La classificació fonamental només contempla dos tipus diferents, corresponents als dos interval·s característics en què es divideix la segona derivada.

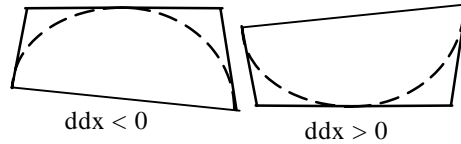


Fig. 4-6 Tipus de trapezis en la classificació fonamental.

- Característiques auxiliars
 - qualitatives: Es distingeix el signe de les derivades en els punts característics (que sempre són punts d'inflexió), per això en la seva classificació útil apareixen més tipus conservant la notació que utilitza en la representació triangular.
 - numèriques: Com a característiques auxiliars numèriques es poden considerar totes aquelles dades necessàries per a la construcció dels trapezis i els propis trapezis.
- Classificació útil: en aquest cas, la classificació útil és formada per 6 tipus de trapezis que conserven la notació de la representació triangular.

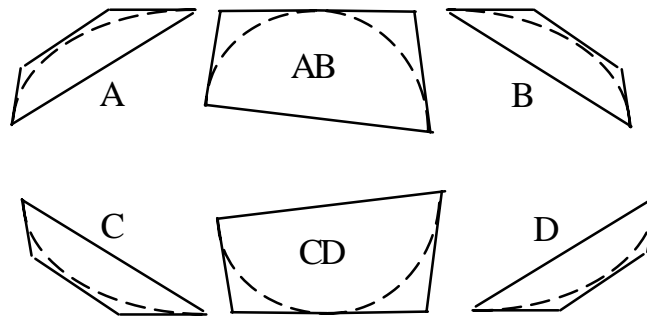


Fig. 4-7 Tipus de trapezis en la classificació útil.

4.8.5 Representació trapezoïdal d'Ayrolles [5]

La representació trapezoïdal d'Ayrolles es fa a partir de la representació triangular agrupant els triangles per parelles per formar trapezis. D'aquesta manera, els trapezis poden estar caracteritzats per la constància del signe de la primera derivada ($[dx]$) o de la segona derivada ($[ddx]$), fent impossible establir una funció característica. Els instants característics són els punts d'inflexió, però no tots ho són. A mode de conclusió es pot dir que aquesta representació no es correspon amb la generalització descrita.

4.8.6 Anàlisi qualitativa de perfils temporals [54]

Aquesta representació tampoc no es correspon exactament amb la generalització descrita. L'expansibilitat del conjunt de tipus d'episodis fa impossible establir una classificació única. Les funcions característiques i els intervals característics són els mateixos que en la representació TDL, però els instants característics són determinats a priori, ja que els episodis es construeixen en intervals temporals prèviament fixats.

4.8.7 Representació qualitativa/quantitativa de senyals [13]

- Funcions característiques: segona derivada (ddx).
- Intervals característics: positiu, zero i negatiu.
- Instants característics: canvis d'interval característic, no es corresponen exactament amb els punts d'inflexió.
- Classificació fonamental: La classificació fonamental contempla tres tipus corresponents als tres intervals característics.
- Característiques auxiliars.
 - Qualitatives: valor qualitatiu del pendent mitjà de l'episodi i els pendents en els extrems de la mateixa manera que la segona derivada. Això comporta una classificació útil que consta de tretze tipus d'episodis.
 - Quantitatives: La informació numèrica de què es disposa són els valors del senyal i de la derivada en els instants característics. A partir d'aquesta informació i dels instants característics es poden trobar altres característiques numèriques.
- Classificació útil: Consta de tretze episodis que es caracteritzen pel valor qualitatiu de la segona derivada, del pendent mitjà i de la derivada en els instants característics (Fig. 4-8).

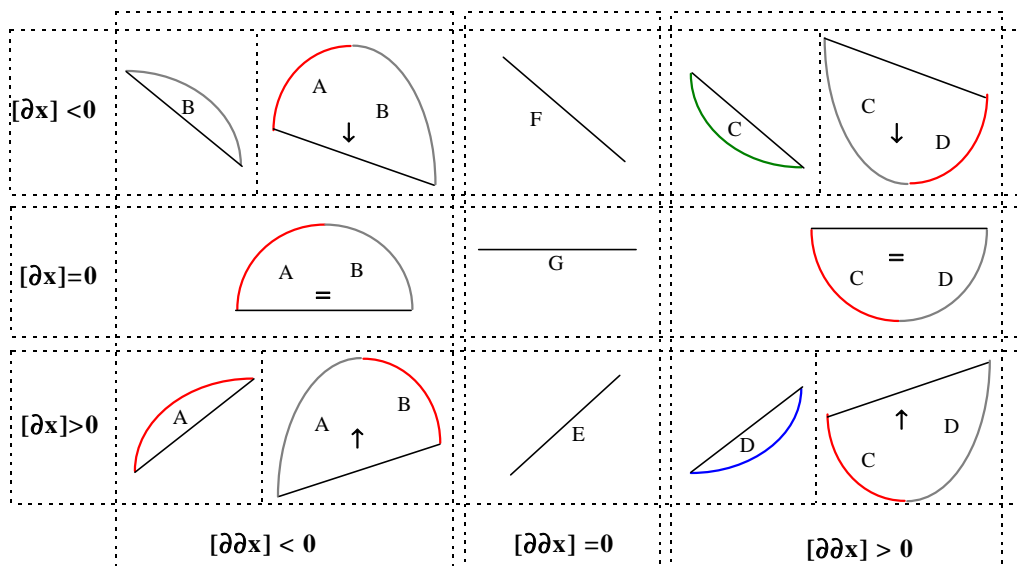


Fig. 4-8 Tipus d'episodis en la classificació útil.

4.9 Conclusions

En aquest capítol s'ha presentat una formalització general de les representacions en episodis. La generalització descrita permet obtenir representacions basades en altres característiques que no solament les derivades del senyal. Des del punt de vista de la Supervisió de processos aquest fet es pot aprofitar per representar no solament la dinàmica dels senyals, sinó també altres característiques que poden ser igualment importants.

La divisió de l'evolució d'un senyal en episodis s'ha de fer d'acord amb allò que es vol representar. Les **funcions característiques** i els **intervalls característics** permeten triar les característiques del senyal a partir de les quals s'elabora la seva representació. Aquestes característiques donen lloc a una **classificació fonamental**, el conjunt d'episodis en què es pot dividir qualsevol senyal. En la pràctica, per enriquir la representació però no per augmentar el número d'episodis en què es divideix un senyal, pot ser necessari tenir en compte altres característiques, anomenades **característiques auxiliars**, que donen lloc a una conjunt més gran (i més significatiu) d'episodis, la **classificació útil**.

La generalització proposada permet descriure les aproximacions a la representació en episodis que es basen en episodis maximals, determinats sempre per les mateixes característiques, i que ocasionen representacions úniques del senyal. Altres aproximacions que no tenen en compte aquestes consideracions queden excloses d'aquesta generalització.

5. UNA NOVA REPRESENTACIÓ

5.1 Introducció

En aquest capítol es descriurà una representació dels senyals basada en episodis que té en compte alguns aspectes que no han estat considerats en les representacions descrites anteriorment. Tot i que en el capítol anterior s'ha mencionat la possibilitat d'obtenir representacions no solament basades en la dinàmica dels senyals, sinó en altres característiques, la nova representació proposada descriu la dinàmica dels senyals. En aquest sentit entra en la mateixa família que les altres aproximacions, s'ha escollit així perquè d'aquesta manera el camp d'aplicacions és molt ampli. Altres representacions basades en altres característiques poden ser més útils en casos concrets, però la seva utilitat pot quedar restringida a aquests casos.

Els trets distintius d'aquesta nova representació, que es detallen al llarg d'aquest capítol es poden resumir en:

- **Utilització d'una sola funció característica.** Això simplifica l'obtenció de la representació i al mateix temps fa que el resultat final (la pròpia representació) sigui més simple (amb un nombre mínim d'episodis) i, per tant, més fàcil d'interpretar i utilitzar. Aquests avantatges estan sotmesos, òbviament, a una tria adequada d'aquesta funció característica. No serveix per res obtenir una representació amb pocs episodis si aquests no són prou significatius.
- **Representació explícita dels períodes d'estabilitat.** Els períodes en què un senyal roman estable en un determinat valor o amb variacions molt petites entorn seu són, en processos controlats, els més llargs i/o freqüents. Per tant, és important que en la representació dels senyals aquests períodes quedin reflectits en forma d'episodis.
- **Representació explícita de les discontinuïtats.** Igualment que els períodes d'estabilitat, les discontinuïtats en el senyal també poden expressar moltes coses sobre el funcionament dels processos. Per això, és convenient que en la representació dels senyals les discontinuïtats apareguin explícitament, en forma d'episodis. En

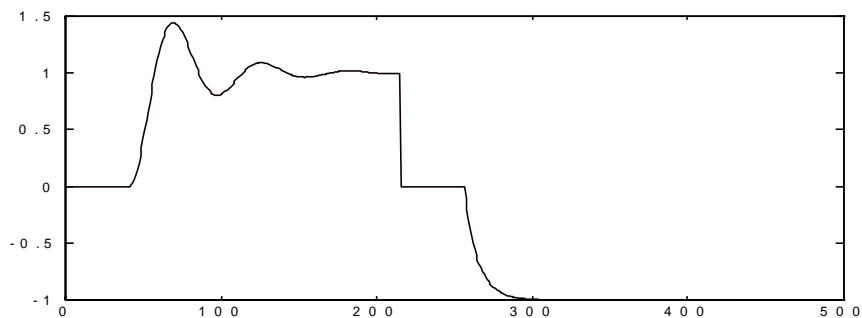
altres representacions les discontinuïtats apareixen en forma de separació de dos episodis contigus i en alguna són eliminades modificant algun d'aquests episodis. En senyals mostrejats les discontinuïtats apareixen en forma de 'canvis més grans del normal' i usualment en un únic instant de temps; en senyals filtrats o que han patit algun tractament previ, però, poden quedar repartides al llarg d'un interval de temps. La nova representació proposada té en compte aquestes consideracions.

- **Obtenció de dades numèriques.** Els episodis ofereixen una representació simplificada dels senyals. Per tant, les dades numèriques obtingudes a partir dels episodis poden aportar informació útil que complementi la informació qualitativa amb un nivell d'abstracció suficient. En la nova representació proposada es preveu el fet d'aprofitar la simplificació que suposen els episodis per obtenir informació numèrica, el nivell d'abstracció de la qual serà igual al dels propis episodis.

5.2 Funció característica

La tria de la funció característica és fonamental per obtenir una bona representació. La funció característica triada en aquesta nova representació és la **segona derivada** del senyal, ja que sembla suficient per representar la dinàmica dels senyal d'una manera prou simple i al mateix temps prou completa. Amb una sola funció característica es pot obtenir una bona representació. Es pot dir que els canvis importants en la dinàmica d'un senyal es produeixen en els extrems, en els punts d'inflexió i en les discontinuïtats. Però els extrems, tot i que queden determinats per la primera derivada, són provocats per la segona derivada, i podem saber de la seva existència (encara que aproximada) coneixent la derivada en els punts d'inflexió. Observant la segona derivada es poden conèixer també les discontinuïtats en el senyal i en la primera derivada. Per tant, és raonable prendre com a funció característica només la segona derivada. La representació trapezoidal descrita en el capítol 3, obtinguda a partir de la representació triangular, i utilitzada per supervisar processos biològics [6], es basa en la constància del signe de la segona derivada en els episodis.

En el senyal de la Fig. 5-1 es pot veure un senyal en què es representen les respostes a un graó d'un sistema de segon ordre i un de primer ordre separats per una discontinuïtat en el senyal. La dinàmica del senyal queda ben representada en la seva segona derivada. Les discontinuïtats en el senyal i en la seva primera derivada (quan s'inicia la resposta de primer ordre) provoquen pics i valors anormals en la segona derivada.



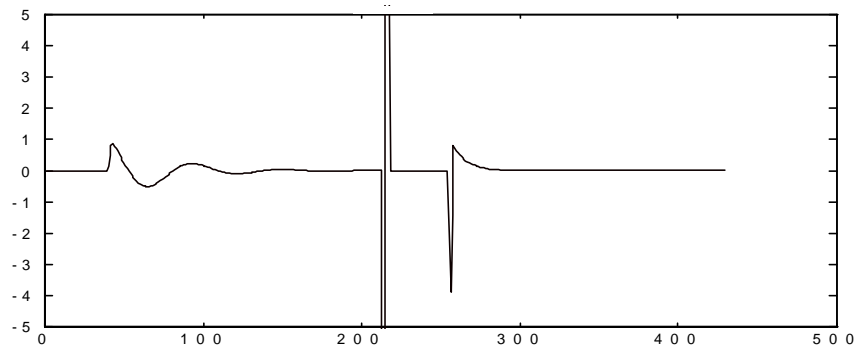


Fig. 5-1: Senyal amb discontinuïtats i segona derivada.

Notació: la segona derivada dels senyal, l'anomenarem **ddx**, i el seu valor qualitatiu, **[ddx]**.

5.3 Intervalls característics

Els intervals característics han de permetre qualificar, a partir de la funció característica, les diverses situacions en què es pot trobar el senyal i que han d'aparèixer en la seva representació.

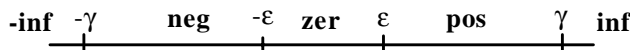


Fig. 5-2 Intervalls característics.

En aquesta nova representació s'han triat 5 intervals característics (Fig. 5-2), de manera que serveixin per descriure correctament els canvis de dinàmica del senyal. L'interval central, centrat en el zero, representa una zona d'inflexió o d'estabilitat, que sigui prou ampla perquè els episodis amb segona derivada nul·la (d'estabilitat o bé episodis d'inflexió) apareguin significativament en la representació del senyal. Els intervals *-inf* i *inf* serveixen per descriure discontinuïtats, les quals provoquen valors molt grans o molt petits en la segona derivada (cal recordar que el punt de partida és un senyal mostrejat). En el senyal de l'exemple, les discontinuïtats en el senyal i en la primera derivada queden reflectides perfectament en la segona derivada. En senyals que han sofert alguna mena de filtratge, però, les discontinuïtats poden no quedar tan ben representades; per això és important triar adequadament el valor de γ , que limita els intervals característics corresponents a *inf* i *-inf*.

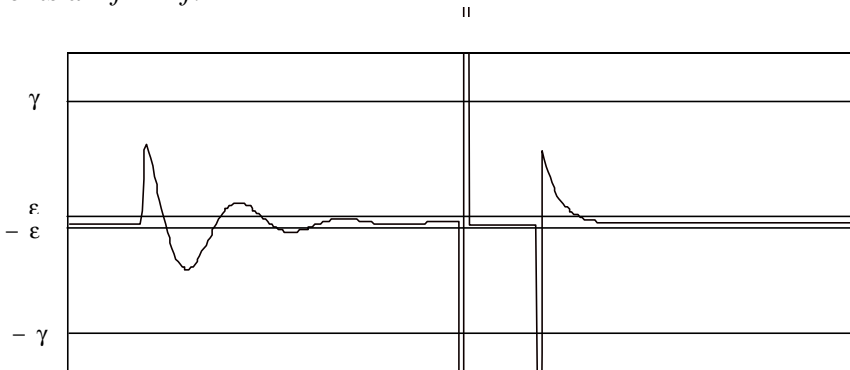


Fig. 5-3 Límits dels intervals característics.

5.4 Instants característics

Tot i que la funció característica és la segona derivada, els instants característics no són pròpiament els punts d'inflexió, sinó que poden representar diversos canvis:

- Començament d'un episodi d'inflexió.
- Acabament d'un episodi d'inflexió.
- Començament d'un episodi de discontinuïtat.
- Acabament d'un episodi de discontinuïtat.
- Punt d'inflexió, només quan el valor qualitatiu de la funció característica passa directament de *pos* a *neg* o a la inversa.

Aquests canvis depenen del canvi d'interval característic que s'ha produït en la segona derivada. Els instants característics només aporten informació sobre l'instant de temps en què s'ha produït algun canvi. Aquesta informació, però, pot ser aprofitada per obtenir altres dades, numèriques o qualitatives, del senyal en aquests instants de temps.

5.5 Classificació fonamental

Com que la representació es basa en una sola funció característica amb cinc intervals característics, la classificació fonamental consta de cinc tipus bàsics d'episodis que poden ser representats de la següent manera:

| | |
|--------------|----------------|
| \cap | : [ddx] = neg |
| \cup | : [ddx] = pos |
| — | : [ddx] = zer |
| \downarrow | : [ddx] = inf |
| \uparrow | : [ddx] = -inf |

Fig. 5-4 Tipus bàsics en la classificació fonamental.

Però es evident que aquests cinc tipus no serveixen per descriure d'una manera prou específica qualsevol dinàmica. Es poden trobar senyals amb comportaments molt diferents que donin lloc a la mateixa representació (Fig. 5-5).

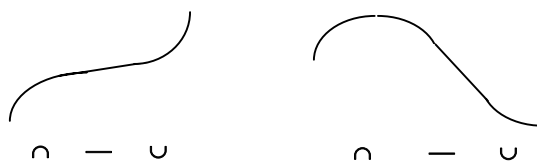


Fig. 5-5 Diversos senyals amb la mateixa representació.

Per obtenir una millor representació hi ha diverses opcions:

- tenir en compte altres funcions característiques
- dividir el rang de valors de la segona derivada en més intervals característics
- tenir en compte altres característiques auxiliars

Les dues primeres opcions comporten una representació més rica, però amb menys abstracció temporal. Considerar més funcions característiques o més intervals característics provoca una classificació amb més tipus d'episodis, però al mateix temps fa que la quantitat d'episodis que apareixen en la representació sigui més gran. Tenint en compte que la segona derivada representa d'una manera prou completa la dinàmica del senyal i que els 5 intervals característics reflecteixen adequadament les possibles situacions que es volen representar, sembla més raonable afegir característiques auxiliars qualitatives que permetin enriquir la classificació fonamental per arribar a obtenir una classificació útil.

5.6 Característiques auxiliars qualitatives

Com a característiques auxiliars qualitatives s'ha escollit els dos **valors qualitius de la derivada en els dos extrems de l'episodi** ([dxl] i [dxr]), obtingut mitjançant una qualificació en tres valors de la derivada en els instants característics que delimiten l'episodi:

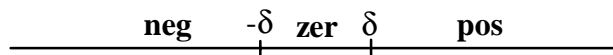


Fig. 5-6 Valors qualitius de la derivada.

Aquesta qualificació s'ha de fer de manera que l'interval *zer* sigui prou significatiu i estigui en concordància amb l'interval *zer* triat per a la segona derivada, ja que sinó poden aparèixer problemes a l'hora de classificar els episodis -es poden donar situacions incompatibles- com s'explica en la secció següent.

Aquestes característiques auxiliars no influeixen en la detecció dels instants característics ni en la durada temporal dels episodis, però permeten establir una classificació (la classificació útil) més expressiva. La utilització de la derivada en els instants característics permet representar millor la dinàmica del senyal i tenir una idea de com la segona derivada ha provocat variacions significatives en el pendent del senyal al llarg d'un episodi.

5.7 Classificació útil

La classificació útil corresponent a tenir en compte la classificació fonamental i les característiques auxiliars dona com a resultat tretze tipus diferents d'episodis, representats pels símbols que es poden veure a la Fig. 5-7.

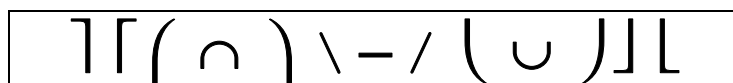


Fig. 5-7 Símbols que representen els 13 tipus d'episodis.

Aquests tretze tipus vénen determinats pels valors qualitius de la segona derivada ([ddx]) i de la primera derivada en els instants característics que limiten l'episodi per la dreta ([dxr]) i per l'esquerra ([dxl]). La classificació no té en compte totes les possibles combinacions d'aquests tres valors, sinó que en alguns casos no es distingeix, per la primera derivada, el valor qualitatiu *zer* dels valors *pos* o *neg*, depenent del cas. També es té en compte que determinades combinacions no són possibles, per exemple el cas en què la segona derivada és positiva (*pos*) i la primera derivada passa de negativa ([dxl] = *neg*) a positiva ([dxr] = *pos*); a aquestes combinacions impossibles, no se'ls ha assignat cap tipus. En les taules Taula 5-1 a Taula 5-5 es poden veure totes les combinacions i el tipus d'episodi associat a cadascuna.

ddx = -inf

| [dxr] | neg | zer | pos |
|-------|-----|-----|-----|
| [dxl] | | | |
| neg |] | ** | ** |
| zer |] | ** | ** |
| pos | [| [| ** |

Taula 5-1

ddx = neg

| [dxr] | neg | zer | pos |
|-------|-----|-----|-----|
| [dxl] | | | |
| neg |) | ** | ** |
| zer |) | (* | ** |
| pos | ∩ | (| (|

Taula 5-2

ddx = zer

| [dxr] | neg | zer | pos |
|-------|-----|-----|-----|
| [dxl] | | | |
| neg | \ | -* | /* |
| zer | * | - | /* |
| pos | * | -* | / |

Taula 5-3

ddx = pos

| [dxr] | neg | zer | pos |
|-------|-----|-----|-----|
| [dxl] | | | |
| neg | (| (| ∪ |
| zer | ** | (* |) |
| pos | ** | ** |) |

Taula 5-4

| ddx = +inf | | | |
|-------------------|-----|-----|-----|
| [dxr] | neg | zer | pos |
| [dxl] | | | |
| neg | ** | └ | └ |
| zer | ** | ** | ┘ |
| pos | ** | ** | ┘ |

Taula 5-5

Els tipus representats amb un asterisc (*) representen combinacions que, en principi, no han de sortir mai, però que poden aparèixer si no es tria bé el valor de δ (és a dir, l'interval pel qual considerem la primera derivada zero) o en senyals molt sorollosos o mal filtrats, o si hi ha algun retard entre la primera i la segona derivada. Els tipus representats amb dos asteriscs (**) són els considerats impossibles.

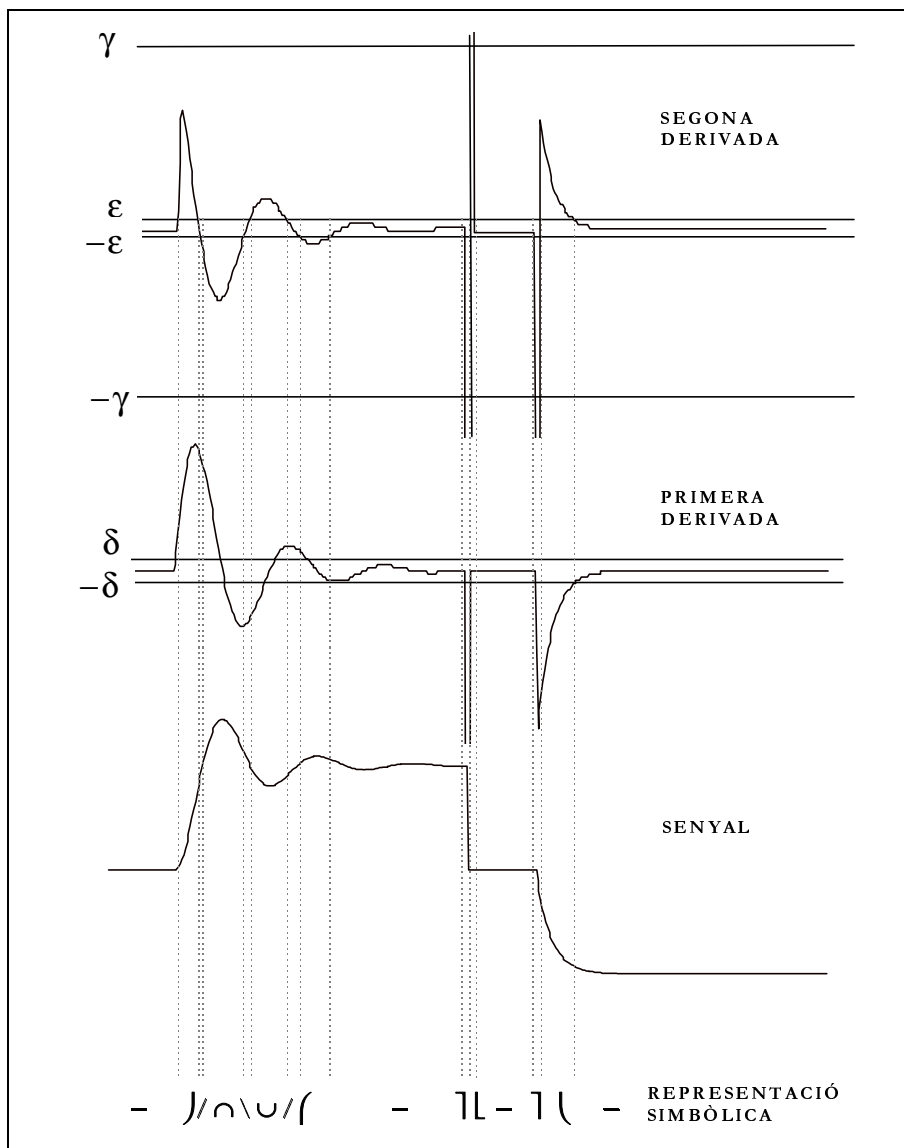


Fig. 5-8 Representació del senyal de la Fig. 5-1.

En la Fig. 5-8 es pot veure detalladament la representació resultant del senyal de la Fig. 5-1. Les discontinuïtats en el senyal i en la primera derivada queden representades explícitament, fet que també succeeix amb els períodes d'estabilitat. Així mateix, es poden veure els episodis d'inflexió que apareixen en els canvis de signe de la segona derivada.

5.8 Característiques auxiliars quantitatives

Les característiques auxiliars quantitatives han de servir per complementar la representació qualitativa. El fet de calcular aquestes dades numèriques a partir dels episodis i instants característics de la representació implica una simplificació i, per tant, un major grau d'abstracció en la informació numèrica obtinguda. A continuació es proposen algunes d'aquestes característiques auxiliars que poden ser útils en alguns casos.

- **Valor del senyal en els instants característics:** Aquesta dada ja ha estat utilitzada en altres representacions. Juntament amb els instants característics es pot considerar com la mínima informació numèrica necessària, en el cas que la informació qualitativa no sigui suficient. Si els instants característics que limiten un episodi són t_l i t_r , el valor del senyal $x(t)$ en aquests instants serà $x(t_l)$ i $x(t_r)$, respectivament. El parell de punts $(t_l, x(t_l))$ i $(t_r, x(t_r))$ es poden definir com a *punts característics* de l'episodi.
- **Recta de suport:** Entendrem per recta de suport d'un episodi la recta que uneix els dos punts característics. Aquesta recta representa l'evolució del senyal sense tenir en compte les oscil·lacions i es pot trobar a partir dels punts característics:

$$\text{recta de suport: } r(t) = r_1 \cdot t + r_0$$

$$T_1 = \begin{pmatrix} t_l & 1 \\ t_r & 1 \end{pmatrix}; \quad X_1 = \begin{pmatrix} x(t_l) \\ x(t_r) \end{pmatrix}; \quad R = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_0 \end{pmatrix};$$

$$R = T_1^{-1} X_1$$

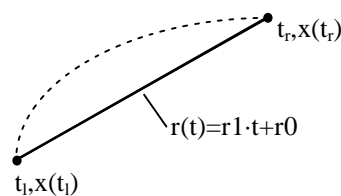


Fig. 5-9 Recta de suport.

- **Valor de la derivada en els instants característics:** En la nova representació aquesta dada és necessària, ja que la seva qualificació és una característica auxiliar qualitativa que s'utilitza en la classificació dels episodis. Per tant, també es pot

utilitzar com a dada numèrica en cas que sigui necessari. Les derivades en els instants característics que limiten un episodi seran anomenades $dx(t_l)$ i $dx(t_r)$, respectivament.

- **Aproximació per una funció cúbica:** A partir dels punts característics i del valor de la derivada en aquests punts es pot trobar una funció cúbica que representi una aproximació del senyal en l'episodi:

$$a(t) = a_3 \cdot t^3 + a_2 \cdot t^2 + a_1 \cdot t + a_0$$

Les condicions per a aquesta funció són que passi pels punts característics i que, en aquests punts, la seva derivada sigui igual a la derivada del senyal:

$$\begin{aligned} x(t_l) &= a_3 \cdot t_l^3 + a_2 \cdot t_l^2 + a_1 \cdot t_l + a_0 \\ x(t_r) &= a_3 \cdot t_r^3 + a_2 \cdot t_r^2 + a_1 \cdot t_r + a_0 \\ dx(t_l) &= 3a_3 \cdot t_l^2 + 2a_2 \cdot t_l + a_1 \\ dx(t_r) &= 3a_3 \cdot t_r^2 + 2a_2 \cdot t_r + a_1 \end{aligned}$$

A partir d'aquestes quatre equacions es poden trobar els coeficients de la funció:

$$X_2 = \begin{pmatrix} x(t_l) \\ x(t_r) \\ dx(t_l) \\ dx(t_r) \end{pmatrix}; \quad T_2 = \begin{pmatrix} t_l^3 & t_l^2 & t_l & 1 \\ t_r^3 & t_r^2 & t_r & 1 \\ 3t_l^2 & 2t_l & 1 & 0 \\ 3t_r^2 & 2t_r & 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{pmatrix};$$

$$A = T_2^{-1} X_2$$

Aquesta aproximació no aporta directament molta informació significativa, però representa una simplificació de la informació numèrica a partir de la qual es poden trobar altres dades, com per exemple les que es presenten a continuació.

- Altres dades que poden ser útils són els valors **màxim** i **mínim** a l'episodi en els episodis de tipus \cap (el màxim) o \cup (el mínim), la **distància entre el màxim o mínim i la recta de suport** o l'**àrea entre el senyal i la recta de suport**.

5.9 Segmentació de l'espai

Una tasca important en la representació en episodis descrita és la tria dels intervals característics, ja que el resultat final depèn dels intervals escollits. El coneixement del sistema i dels senyals que provenen d'ell és la informació de què es disposa per fer una elecció adequada dels intervals característics. En aquesta secció es proposa un mètode basat en l'aproximació que es pot fer de les variacions del senyal per la resposta a un graó unitari de sistemes de primer o segon ordre. Aquesta aproximació es fa sovint per dissenyar i sintonitzar controladors, ja sigui per identificar el sistema o per triar la resposta desitjada, i pot resultar d'utilitat.

El mètode proposat es basa en fer que en el temps d'establiment t_s el sistema entri en un episodi del tipus $-$. El temps d'establiment està definit com el temps que necessita la corba per arribar i mantenir-se dins del rang del 5 % o el 2 % al voltant del valor final. Si es coneix el valor absolut de la segona derivada en el temps d'establiment i es trien els límits de l'interval característic **zer** iguals a aquest valor (positiu i negatiu), s'aconsegueix que en la representació comenci un episodi de tipus $-$ a t_s i que aquest episodi continuï fins que no hi hagi cap més canvi.

El temps d'establiment es pot obtenir empíricament a partir de les corbes de resposta del sistema. Però també es pot conèixer analíticament a partir de la funció de transferència per sistemes de primer o de segon ordre [69]. També es pot conèixer analíticament la segona derivada en funció del temps i dels paràmetres de la funció de transferència.

Per tant, si podem identificar el sistema mitjançant una funció de transferència de primer o segon ordre (o els senyals que provenen del sistema amb la resposta a un graó unitari de sistemes de primer o segon ordre), podrem obtenir analíticament uns límits adequats per als intervals característics. En les seccions següents s'expliquen les fórmules que ho permeten.

5.9.1 Sistemes de primer ordre

Un sistema de primer ordre es pot representar mitjançant la funció de transferència:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

on K i T són el guany i la constant de temps i determinen totalment el sistema. La resposta temporal a un graó unitari i les seves derivades vénen donades per:

$$c(t) = K(1 - e^{-t/T})$$

$$c'(t) = K/T e^{-t/T}$$

$$c''(t) = -K/T^2 e^{-t/T}$$

Per a sistemes de primer ordre, el temps d'establiment és aproximadament $t_s=4T$; és a dir, per $t=4T$ el senyal arriba al 98% del valor final. Per tant, podem trobar el valor de la primera i la segona derivades en el temps d'establiment:

$$c(4T) = K(1 - e^{-4}) = 0.98 \cdot K$$

$$c'(4T) = K/T e^{-4} = 0.018 \cdot K/T$$

$$c''(4T) = -K/T^2 e^{-4} = 0.018 \cdot K/T^2$$

Tenint en compte que estem treballant amb aproximacions i que el resultat final és un valor qualitatiu, **0.02K/T** i **0.02K/T²** podrien ser els límits per l'interval característic **zer** per la primera i la segona derivada, respectivament. Això serà útil per sistemes de

primer ordre, amb retard o sense, o per sistemes sense oscil·lacions amb un pol dominant i, en general, per senyals que poden ser aproximats per a una resposta de primer ordre.

5.9.2 Sistemes de segon ordre

Un sistema de segon ordre es pot representar, en general, mitjançant la següent funció de transferència:

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

En aquesta secció s'estudiarà el cas en què $0 < \xi < 1$, per valors de ξ més grans que 1, el sistema es pot tractar igual que un sistema de primer ordre. En aquest cas la resposta a un graó unitari i les derivades corresponents venen donades per:

$$c(t) = K \left(1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \sin(\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}) \right) = K \left(1 - e^{-\xi\omega_n t} \left(\cos\omega_d t + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin\omega_d t \right) \right)$$

$$c'(t) = K e^{-\xi\omega_n t} \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin\omega_d t$$

$$c''(t) = K e^{-\xi\omega_n t} \frac{\omega_n^2}{\sqrt{1-\xi^2}} (\sqrt{1-\xi^2} \cos\omega_d t - \xi \sin\omega_d t) =$$

$$= K e^{-\xi\omega_n t} \omega_n^2 \left(\cos\omega_d t - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin\omega_d t \right)$$

on $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}$.

Considerant el criteri del 2%, el temps d'establiment es pot aproximar per $t_s \cong 4/\xi\omega$. Els valors de la derivada i de la segona derivada per aquest temps son, respectivament:

$$c' \left(\frac{4}{\xi\omega_n} \right) = K e^{-4} \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \frac{4\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}$$

$$c'' \left(\frac{4}{\xi\omega_n} \right) = K e^{-4} \omega_n^2 \left(\cos 4 \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin 4 \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right)$$

Si representem aquestes funcions en funció de ξ , es pot veure clarament que presenten oscil·lacions i que, per determinats valors de ξ , valen zero per a la primera o per a la segona derivada a $t = t_s$ (Fig. 5-1 i Fig. 5-2).

Per obtenir una funció més senzilla i amb menys variacions una possible solució pot ser utilitzar les envolupants de les dues funcions, representada amb punts en les figures.

Amb aquest criteri $Ke^{-4} \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} = 0.018K \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}}$ seria el límit per a la primera derivada i $Ke^{-4} \frac{\omega_n^2}{\sqrt{1-\xi^2}} = 0.018K \frac{\omega_n^2}{\sqrt{1-\xi^2}}$ seria el límit per a la segona derivada.

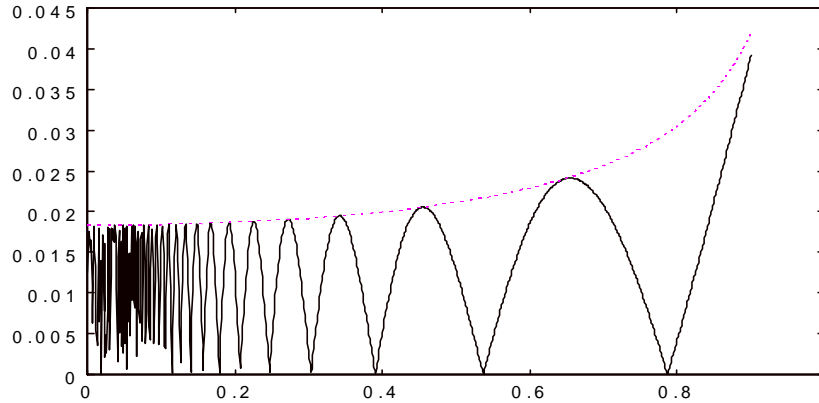


Fig. 5-10 Valor de la primera derivada a t_s en funció de ξ per $K=\omega_n=1$.

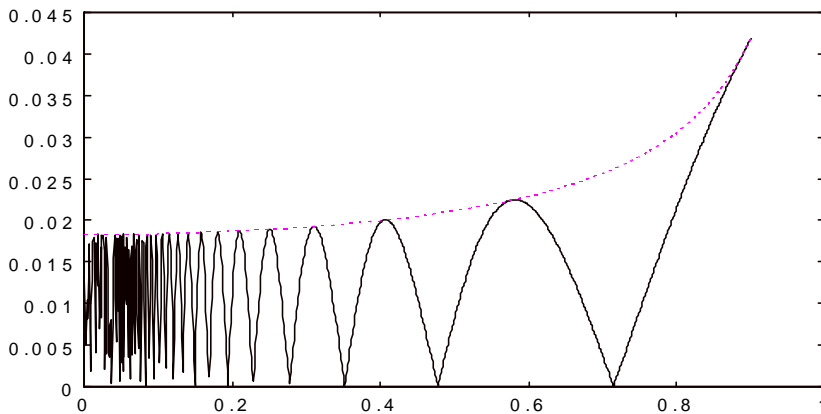


Fig. 5-11 Valor de la segona derivada a t_s en funció de ξ per $K=\omega_n=1$.

Però aquests límits presenten problemes, ja que, en triar l'envolupant, sempre es prenen valors dels límits més grans o, només en alguns casos, iguals als valors que es podrien considerar els correctes. Això fa que, en la representació amb els límits obtinguts, el sistema entri en l'episodi — molt abans d'arribar al temps d'establiment. Per tant aquest criteri per triar els límits, tot i ser útil en alguns casos, no és aplicable en general.

Una altra aproximació amb la que s'obtenen millors resultats consisteix en prendre no l'envolupant sinó la meitat de l'envolupant, que representa el valor mitjà de la funció (Fig. 5-12). D'aquesta manera, s'obtenen uns valors dels límits amb els quals la representació final és més propera al que es desitja; és a dir, l'episodi — apareix a prop del temps d'establiment. Aquests valors dels límits són, doncs:

$$\frac{K}{2} e^{-4} \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} = 0.009K \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}}, \text{ per a la primera derivada.}$$

$$i \frac{K}{2} e^{-4} \frac{\omega_n^2}{\sqrt{1-\xi^2}} = 0.009 K \frac{\omega_n^2}{\sqrt{1-\xi^2}}, \text{ per a la segona derivada.}$$

Es pot observar, però, que aquests límits tendeixen a infinit quan ξ tendeix a 1, per tant, és necessària una altra aproximació per valors de ξ propers a 1. La solució adoptada és la següent:

- Per $0 < \xi \leq 0.8$ els límits són els trobats anteriorment

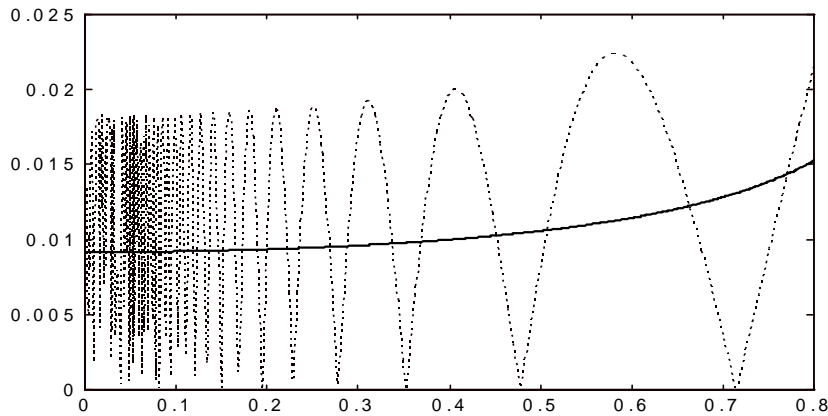


Fig. 5-12 Límit per a la segona derivada en funció de ξ per $K=\omega_n=1$.

- Per a $0.8 < \xi \leq 1$ els límits vénen donats per l'equació d'una recta que s'ajusta experimentalment, de manera que per a $\xi=0.8$ hi hagi continuïtat amb la funció triada per a $\xi < 0.8$ i per a $\xi=1$ el valor sigui el mateix que el de la funció exacta. Amb aquestes consideracions les funcions per als límits queden de la següent manera:

$$K \omega_n e^{-4} (16\xi - 12) \approx 0.018 K \omega_n (16\xi - 12), \text{ per a la primera derivada}$$

$$i K \omega_n^2 e^{-4} (11\xi - 8) \approx 0.018 K \omega_n^2 (11\xi - 8), \text{ per a la segona derivada}$$

En la Fig. 5-13 es poden observar les representacions d'aquestes dues rectes i de la funció exacta per a uns determinats valors de K i ω_n i per a $0.8 < \xi \leq 1$.

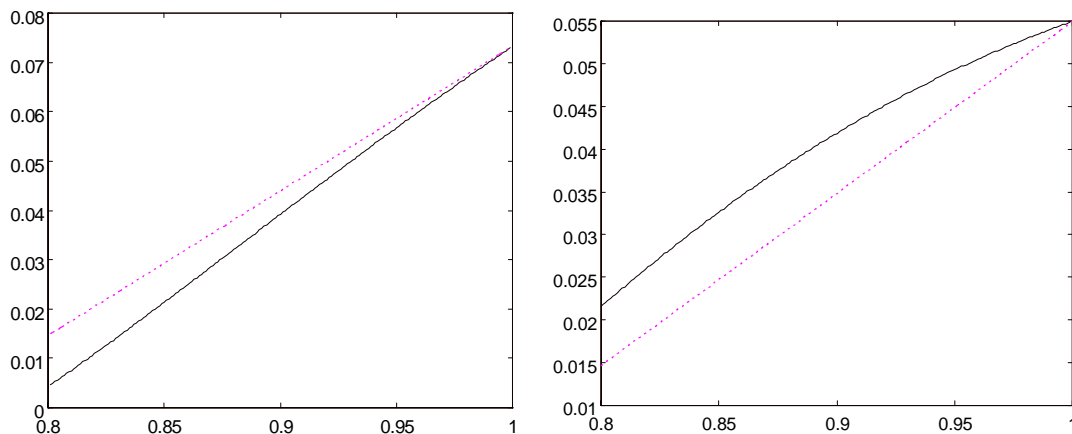


Fig. 5-13 Límits per a la primera i segona derivada en funció de ξ per $K=\omega_n=1$.

Finalment, cal remarcar que en molts casos no és possible ajustar els límits utilitzant les fórmules que s'han presentat en aquesta secció; però, en qualsevol cas poden representar una ajuda per triar-los. La inspecció de les derivades dels senyals que es volen representar i un ajustament manual dels límits pot ser, en aquests casos, més útil, tot i que representi una tasca més complicada.

5.10 Comparativa amb altres representacions

En aquesta secció s'estableix una comparació entre les diverses representacions descrites en capítols anteriors i la descrita en aquest capítol des del punt de vista del resultat final. En la comparació només es té en compte la representació simbòlica obtinguda en cada cas. Per il·lustrar les diferències existents s'han obtingut les diferents representacions d'un mateix senyal, la qual cosa ha donat com a resultat el que es pot veure en les figures Fig. 5-14 a Fig. 5-17.

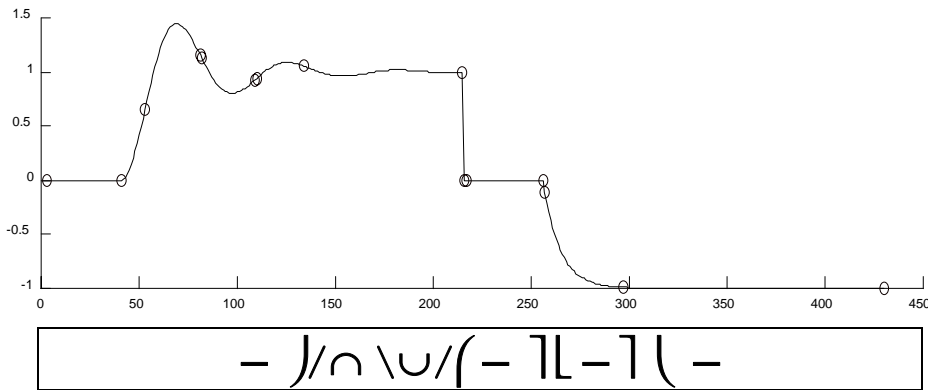


Fig. 5-14 Senyal, instants característics i representació. Obtinguts utilitzant la nova representació.

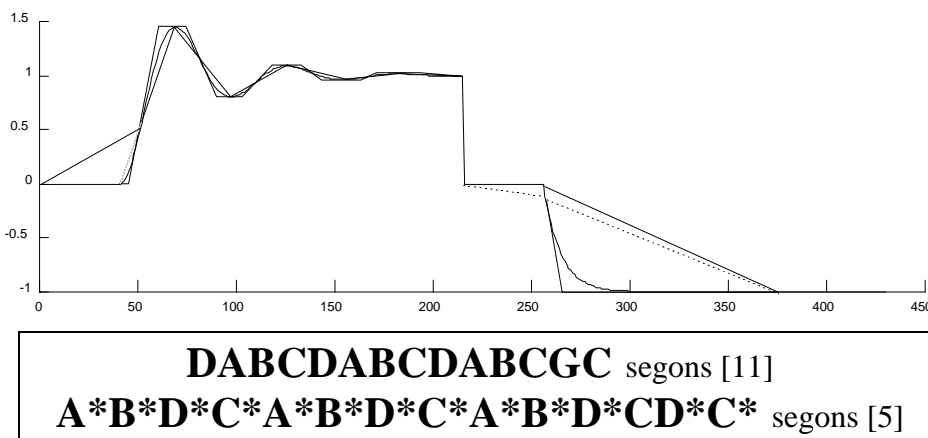


Fig. 5-15 Senyal i la seva representació triangular.

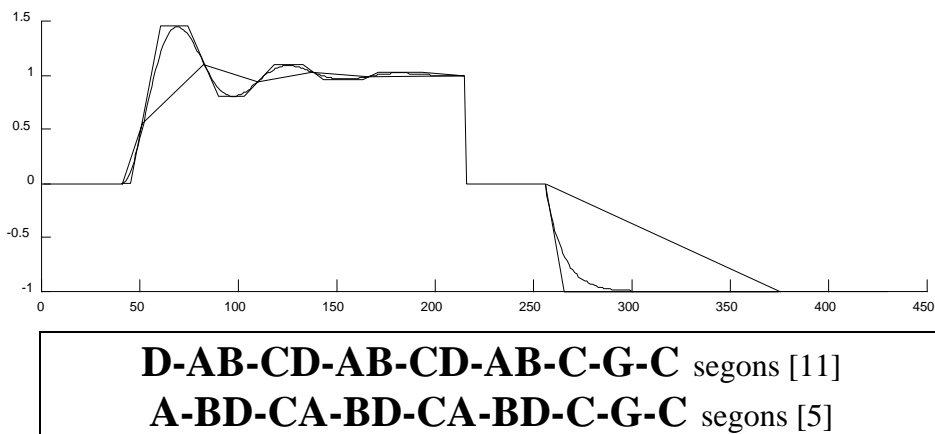


Fig. 5-16 Senyal i la seva representació trapezoidal.

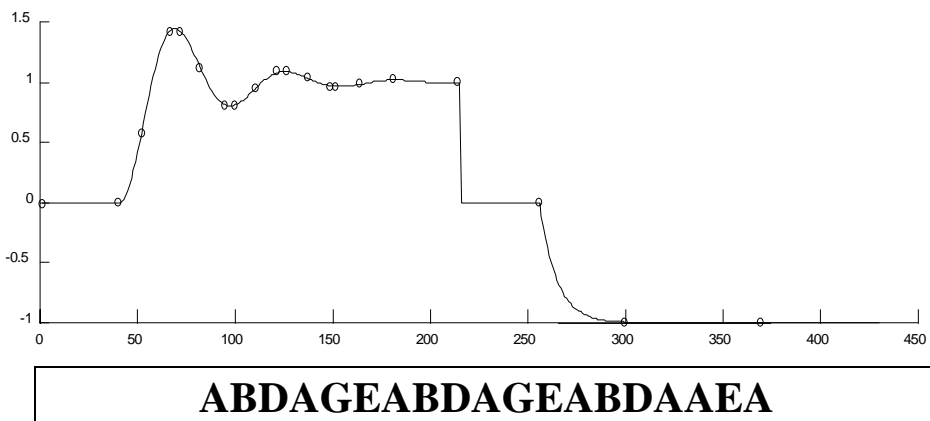


Fig. 5-17 Senyal, instants de separació dels episodis i representació. Obtinguts utilitzant TDL

La diferència principal entre la nova representació i totes les altres són els episodis de discontinuïtat; en les altres, les discontinuïtats apareixen en forma de separació entre episodis, la qual cosa pot induir a confusions. Un altre tret característic de la nova representació són els episodis d'inflexió, en comptes dels punts d'inflexió (entre episodis) que apareixen en les altres representacions; l'aportació dels episodis d'inflexió és que la seva durada està relacionada amb la rapidesa dels canvis, fins al punt que no apareixen en canvis molt ràpids.

Les representacions TDL i triangular tenen en comú que s'obtenen utilitzant la primera i segona derivades, la qual cosa fa que apareguin més episodis que en la nova representació, cosa que indica un menor grau d'abstracció temporal. En aquest sentit la nova representació és més semblant a la representació trapezoidal, on només es té en compte la segona derivada.

Una altra característica que no és exclusiva de la nova representació és l'aparició d'episodis d'estabilitat. Aquests episodis no apareixen en les representacions triangular o trapezoidal, però sí són presents en la representació TDL.

Com a conclusió final es pot dir que la nova representació té algunes característiques pròpies i altres que són comunes a altres representacions, si bé és l'única que les agrupa totes.

5.11 Conclusions

Les principals conclusions que es poden obtenir d'aquest capítol fan referència a les característiques pròpies de la nova representació. Es pot destacar que utilitzant una sola funció característica, la segona derivada, es poden representar correctament els trets fonamentals de la dinàmica dels senyal, com són les oscil·lacions (\cap, \cup), els períodes de creixement ($(/,)$) o decreixement ((\backslash, \backslash)) i, principalment, des del punt de vista de la Supervisió de processos:

- Els períodes d'estabilitat, representats per episodis de tipus $-$. En la nova representació, els períodes en què un senyal roman estable o amb variacions petites al voltant d'un valor són representats explícitament en forma d'episodis. A més, és relativament fàcil especificar en quins casos han d'aparèixer aquests episodis, ja que només cal especificar un llindar per a la segona derivada. De la mateixa manera apareixen episodis de creixement o decreixement constant ($/, \backslash$), determinats pel mateix llindar. Aquest fet comporta l'aparició d'*episodis d'inflexió*, de curta durada, entre episodis amb diferent convexitat, fet que no representa cap problema i és coherent amb la resta de la representació.
- Les discontinuitats, molt representatives en Detecció de fallades. Mitjançant l'especificació d'un altre llindar i utilitzant la mateixa funció característica es poden determinar i representar explícitament les discontinuitats en el senyal i en la primera derivada del senyal. Les dificultats addicionals per representar aquests episodis són poques i, en canvi, la seva utilitat és gran.

6. EXEMPLES D'ANÀLISI QUALITATIVA DE SENYALS

6.1 Introducció

En aquest capítol, amb l'objectiu de mostrar la utilitat de la nova representació, s'analitzen diversos senyals simulats prèviament emmagatzemats. En aquests exemples es veu com els trets característics de cada senyal queden ben reflectits en la seva representació. S'ha obtingut la representació de la resposta a un graó de sistemes lineals de diferents ordres, estables i inestables. També s'han representat els senyals corresponents a un sistema no lineal en diferents situacions. En tots els casos la representació és vàlida per descriure adequadament el comportament dels senyals.

6.2 Anàlisi de respostes de sistemes lineals a un graó

En aquests primers exemples s'han estudiat representacions de la resposta a un graó de sistemes lineals de primer ordre, de segon ordre, d'ordre superior, estables i inestables, amb oscil·lacions i sense, i de tipus 1. Es pot dir que aquest conjunt de senyals representats inclou totes les dinàmiques dels senyals que provenen de sistemes lineals. Els límits per als episodis característics s'han trobat en cada cas seguint les especificacions donades en el capítol anterior. Els resultats obtinguts es poden considerar satisfactoris en el sentit que els diferents comportaments dels senyals queden ben representats. A cada secció es comenten les principals conclusions que es poden extreure de cadascun dels exemples estudiats. Cal remarcar que l'objectiu d'aquests exemples és mostrar com es representen les diverses dinàmiques dels senyals i no pas intentar identificar els sistemes dels quals provenen.

6.2.1 Sistemes de primer ordre

En aquest cas la representació ens mostra una discontinuïtat en la primera derivada amb l'aparició d'un episodi \downarrow , a continuació hi ha un episodi de creixement esmorteït (\uparrow) i finalment un episodi d'estabilitat en què el senyal es manté constant (\rightarrow). Aquesta

successió d'episodis ens serveix perfectament per descriure la resposta a un graó d'un sistema de primer ordre.

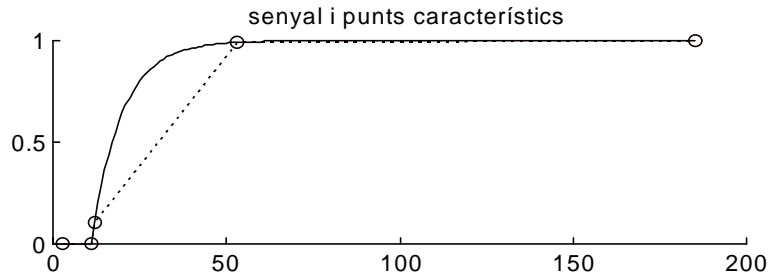


Fig. 6-1 Resposta d'un sistema de primer ordre.

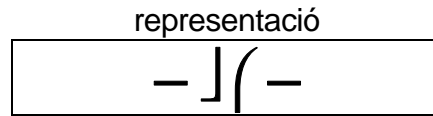


Fig. 6-2 Representació del senyal de la Fig. 6-1.

6.2.2 Sistemes de segon ordre

En els senyals procedents de sistemes de segon ordre ens podem trobar amb dues dinàmiques ben diferenciades: amb oscil·lacions o sense.

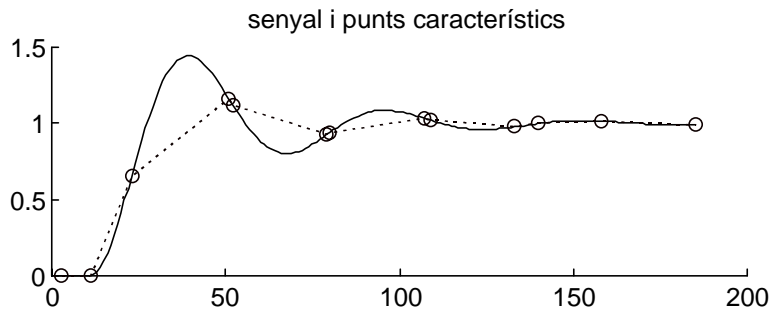


Fig. 6-3 Resposta d'un sistema de segon ordre amb oscil·lacions.

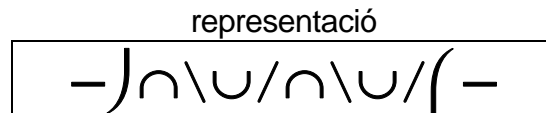


Fig. 6-4 Representació del senyal de la Fig. 6-3.

En tots dos casos la resposta s'inicia amb un episodi \int , és a dir, no hi ha cap discontinuïtat en l'inici de la resposta. Les oscil·lacions queden representades amb els episodis \cap i \cup , que es van repetint en funció de l'esmoreïment. Els episodis $/$ i \backslash que apareixen entre els anteriors representen episodis d'inflexió; la seva aparició depèn dels valors límit de l'interval característic $[ddx]=zer$ i del període de mostratge. En tots els casos, i passat un cert temps, el senyal arriba a un episodi $-$, la qual cosa indica que arriba a un valor estacionari.

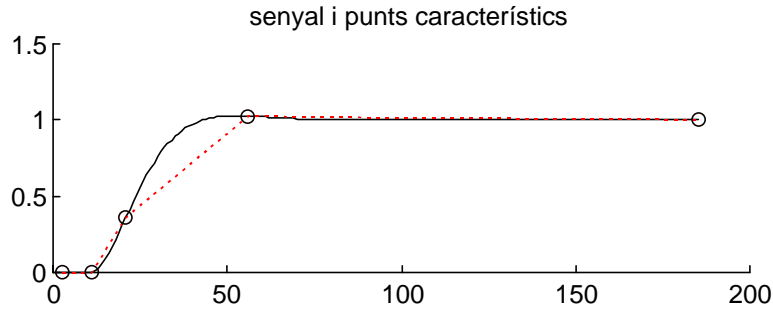


Fig. 6-5 Resposta d'un sistema de segon ordre sense oscil·lacions.

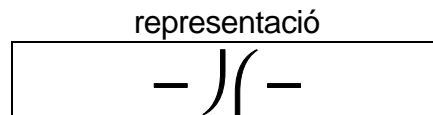


Fig. 6-6 Representació del senyal de la Fig. 6-5.

6.2.3 Sistemes d'ordre superior

Els senyals que provenen de sistemes d'ordre superior poden presentar dinàmiques molt diferents. La presència d'oscil·lacions i l'estabilitat queden representades de la mateixa manera que s'ha descrit en els casos anteriors. Com es veu en l'exemple de la Fig. 6-8, també es poden succeir episodis \int i $($; en qualsevol cas, la dinàmica del senyal pot ser molt variada i per tant també ho serà la representació.

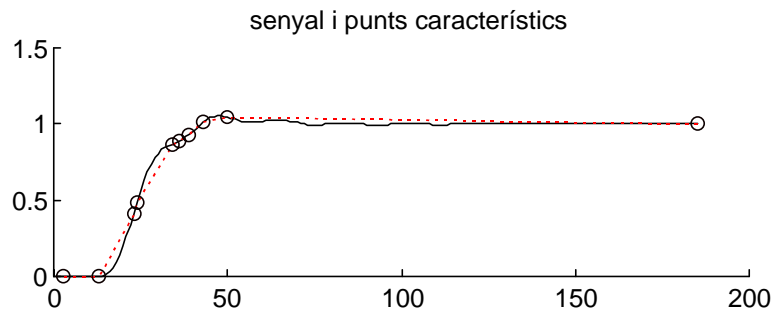


Fig. 6-7 Resposta d'un sistema d'ordre 4.

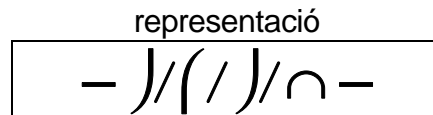


Fig. 6-8 Representació del senyal de la Fig. 6-7.

6.2.4 Sistemes de tipus 1

La principal característica de la resposta a un graó dels sistemes de tipus 1 és que el senyal és sempre creixent. En les figures Fig. 6-10 i Fig. 6-12 es pot observar l'aparició d'un episodi

/ al final que ens indica aquest creixement permanent. En aquest cas la presència o no d'oscil·lacions queda representada per la successió d'episodis J_i .

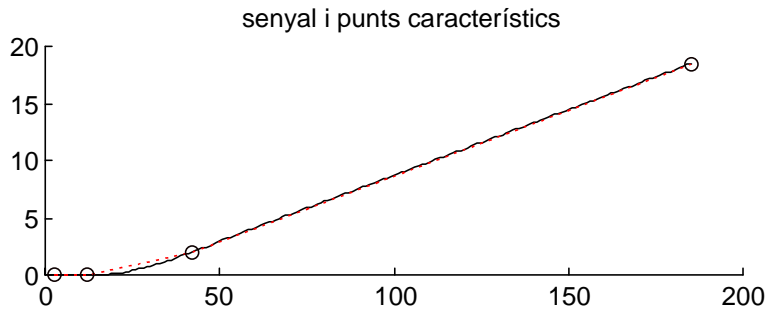


Fig. 6-9 Resposta d'un sistema de tipus 1.

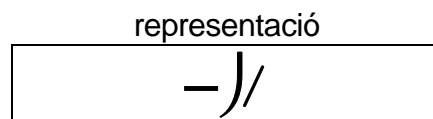


Fig. 6-10 Representació del senyal de la Fig. 6-9.

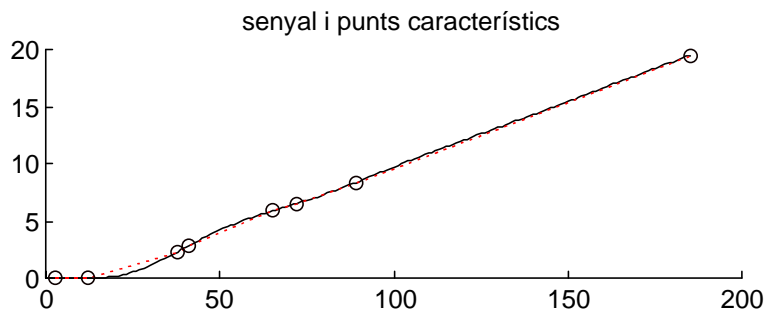


Fig. 6-11 Resposta d'un sistema de tipus 1.

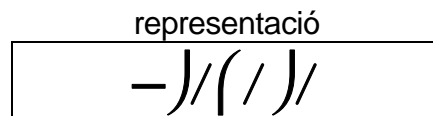


Fig. 6-12 Representació del senyal de la Fig. 6-11.

6.2.5 Sistemes inestables

Les respostes als sistemes inestables es caracteritzen per una oscil·lació permanent o creixent o per un creixement exponencial. Aquests trets característics es poden distingir en les representacions d'aquests sistemes. En el cas d'una oscil·lació permanent (Fig. 6-13), els episodis \cap i \cup se succeeixen indefinidament, i les característiques numèriques d'aquests episodis (com la durada o l'amplitud) són aproximadament iguals.

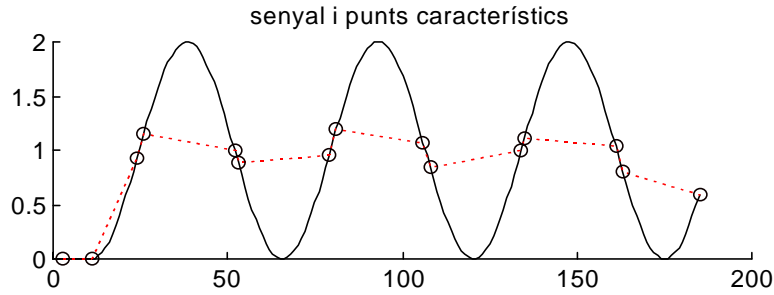


Fig. 6-13 Senyal amb una oscil·lació permanent.



Fig. 6-14 Representació del senyal de la Fig. 6-13.

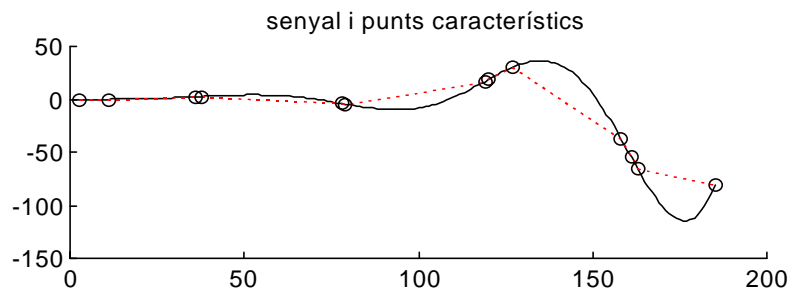


Fig. 6-15 Resposta inestable amb oscil·lacions.

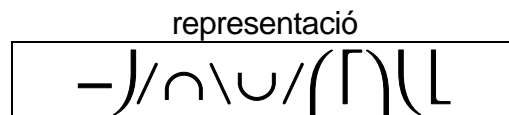


Fig. 6-16 Representació del senyal de la Fig. 6-15.

En el cas de senyals que presenten creixement exponencial, amb oscil·lacions o sense, sempre acaben apareixent episodis J, L, Γ, o Γ, que en aquest cas no indiquen discontinuïtats, sinó valors extrems de la segona derivada. Els episodis \, - o / només apareixen amb durades molt curtes en les transicions entre altres episodis com a episodis d'inflexió. Les característiques auxiliars numèriques indiquen que la durada o l'amplitud de les oscil·lacions va creixent a mesura que passa el temps.

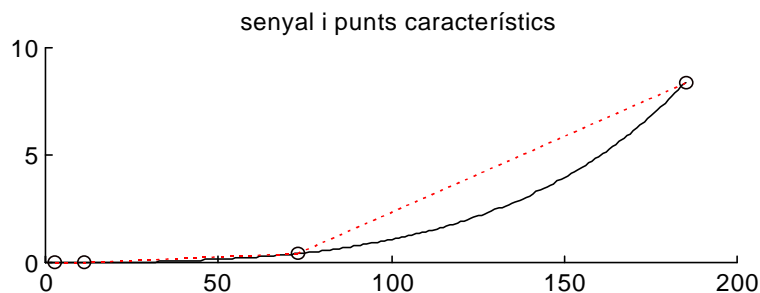


Fig. 6-17 Resposta inestable sense oscil·lacions.

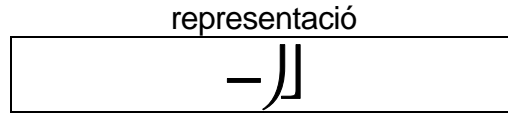


Fig. 6-18 Representació del senyal de la Fig. 6-17.

6.3 Anàlisi de trajectòries d'un sistema no lineal

Amb l'objectiu de provar la utilitat de la representació en episodis també en sistemes no lineals, s'ha estudiat un model simplificat conegut com de depredador-presa en el qual els resultats són senyals periòdics [51]. En sistemes no lineals les mateixes variacions no sempre produeixen els mateixos efectes, l'evolució del sistema depèn de les condicions inicials i dels moments en què es produeixen els canvis.

S'han fet diverses simulacions del model amb diferents valors dels paràmetres, i a continuació s'ha obtingut la representació en episodis dels senyals resultants. L'objectiu final és poder reconèixer les diverses situacions a partir de les representacions obtingudes. Aquest model ha estat també estudiat a [5], on, a partir d'una representació a diverses escales temporals se separen les diferents dinàmiques que componen els senyals.

6.3.1 Model depredador - presa

El model conegut com depredador-presa va ser formulat per Vito Volterra per modelar la interacció entre diferents tipus de peix en el Mediterrani. Volterra va fer les hipòtesis següents:

- La població total de peix a l'instant t , la suposem dividida en dos grups. Els peixos bons per al consum, $N1(t)$, i els que no ho són, $N2(t)$.
- Els peixos bons per al consum no s'alimenten de peix, són les preses, i els dolents s'alimenten dels peixos bons, són els depredadors.
- Els peixos bons no tenen competència entre ells; per tant es pot pensar que creixen segons la llei malthusiana: la velocitat de creixement de la població és proporcional a la població,

$$\frac{dN}{dt}(t) = rN(t).$$

- El contacte entre les dues espècies és positiu per al depredador i negatiu per a la presa i, a més, és proporcional al producte del nombre d'individus de les dues espècies.
- El creixement del depredador és degut únicament als encontres amb les preses.
- La mort de les preses és deguda als encontres amb els depredadors, mentre que els depredadors moren de manera natural i proporcional al seu nombre.

Amb aquestes hipòtesis, Volterra va obtenir el sistema d'equacions següent:

$$\frac{dN_1}{dt} = aN_1 - bN_1N_2$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -cN_2 + dN_1N_2$$

on a , b , c i d són constants positives.

Aquest és un model molt senzill d'interacció entre dues poblacions i només dóna els trets generals del sistema. En aplicacions concretes, cal afegir més termes, modificar els coeficients i posar-los en funció del temps o potser en funció de les poblacions.

La formulació d'aquest model es va fer per explicar la influència de la pesca en les poblacions de peixos bons i dolents. Concretament, per explicar el fenomen que va observar el biòleg italià Umberto d'Ancona al port italià de Fiume durant la primera guerra mundial, en què la proporció de peix dolent pescat cada any va créixer a causa de, semblava ser, la disminució de pesca durant aquest període.

Si introduïm la pesca en el model anterior, tindrem que aquesta fa decreixer la població de peixos bons i dolents al mateix ritme, en funció de la intensitat de la pesca. S'obté d'aquesta manera el següent model:

$$\frac{dN_1}{dt} = aN_1 - bN_1N_2 - \varepsilon N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -cN_2 + dN_1N_2 - \varepsilon N_2$$

on ε és una constant positiva que representa la intensitat de la pesca suposant que es fa en vaixell i utilitzant xarxes; per això és la mateixa per a tots el tipus de peix. Aquest model es pot tornar a escriure com:

$$\frac{dN_1}{dt} = (a - \varepsilon)N_1 - bN_1N_2$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -(c + \varepsilon)N_2 + dN_1N_2$$

Que és semblant a l'inicial (sense pesca) amb l'única diferència de la modificació dels coeficients a i c .

Aquests models donen com a resultat funcions periòdiques per N_1 i N_2 . Es demostra que el valor mitjà de les variables en un període és, si els coeficients són positius:

$$\bar{N}_1 = \frac{c}{d}$$

$$\bar{N}_2 = \frac{a}{b}$$

per al model sense pesca, i:

$$\bar{N}_1 = \frac{c + \varepsilon}{d} \quad \text{per al model amb pesca.}$$
$$\bar{N}_2 = \frac{a - \varepsilon}{b}$$

Això explica que la pesca sigui beneficiosa per a la població de preses i perjudicial per a la població de depredadors sempre que la pesca sigui moderada ($\varepsilon < a$). En cas contrari ($\varepsilon > a$), la població de preses (N_1) decreix fins a desaparèixer i, en conseqüència, també desapareix la població de depredadors (N_2). Això ens demostra que un excés de pesca és perjudicial per a aquest ecosistema.

D'altra banda, en aquest model les condicions inicials determinen la futura evolució del sistema pel que fa al període, l'amplitud i la forma de les oscil·lacions de les poblacions respecte del valor mitjà. La influència de la pesca, per tant, varia en funció de l'instant en què s'hi introdueix, ja que depèn dels valors de les poblacions en aquest instant. La introducció de la pesca representa un canvi de model, i l'evolució futura depèn de les condicions inicials per al nou model.

L'interès d'aquest model en aquest treball es fonamenta en el fet que, suposant que a , b , c i d són constants:

- el model és no lineal.
- els resultats són normalment senyals periòdics.
- el començament de la pesca suposa un canvi en la dinàmica del sistema. Aquest canvi representa, en moltes ocasions, discontinuïtats en els senyals.
- el període i els valors mitjans dels senyals depenen de la intensitat de pesca ε .
- els resultats poden deixar de ser senyals periòdics a partir de certs valors de la intensitat de pesca ε .

Per tant, pot resultar interessant veure com diferents valors de la intensitat de pesca ε i diferents condicions inicials donen lloc a diferents representacions i com a partir de les representacions es poden deduir els canvis introduïts.

6.3.2 Simulació

Per obtenir els resultats a partir del model, aquest s'ha simulat utilitzant SIMULINK, i les dades s'han analitzat en MATLAB utilitzant les funcions creades per a obtenir la representació. Els valors dels paràmetres utilitzats segurament no s'assemblen gens a cap sistema real, però aquest no és l'objectiu de l'estudi. L'objectiu final és veure com el paràmetre ε influeix en la dinàmica del sistema a partir de l'estudi de les representacions dels resultats de la simulació.

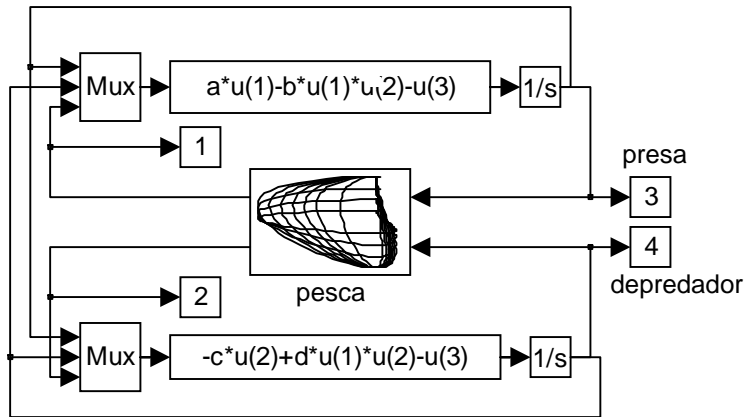


Fig. 6-19 Model depredador-presa amb pesca.

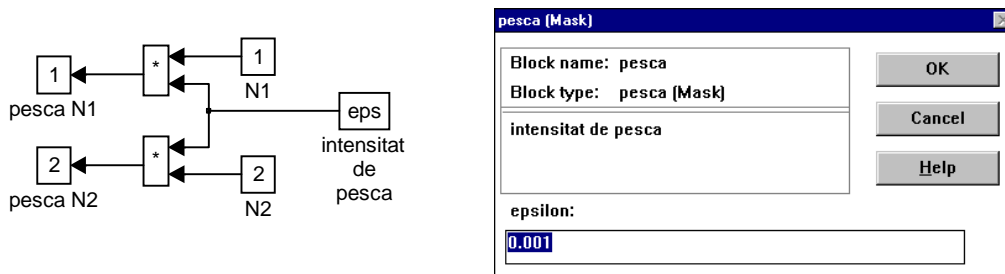


Fig. 6-20 Bloc Pesca amb ϵ variable durant la simulació.

Els valors dels paràmetres del model utilitzats en les simulacions portades a terme són:

$$\begin{aligned} a &= 0.01 \\ b &= 0.03 \\ c &= 0.03 \\ d &= 0.03 \end{aligned}$$

en les unitats corresponents. En aquest cas s'ha triat com a unitat de temps el dia. En tots els casos s'ha simulat un període de 10 anys amb un temps de mostratge d'una setmana.

S'ha estudiat el sistema en les següents situacions:

- Model sense pesca amb diferents condicions inicials.
- Model amb pesca moderada a partir de diferents instants i amb diferents condicions inicials.
- Model amb excessiva pesca a partir de diferents instants i amb diferents condicions inicials.

En els apartats següents es presenten els resultats de les simulacions, la seva representació i la interpretació de les representacions obtingudes. Els senyals representen l'evolució de les poblacions de preses (N1, en línia compacta) i de depredadors (N2, en línia de punts).

6.3.3 Resultats de la simulació

- *Model sense pesca amb diferents condicions inicials.* En aquest cas es pot veure que amb condicions inicials properes als valors mitjans les oscil·lacions són molt febles, mentre que per condicions inicials allunyades dels valors mitjans les oscil·lacions tendeixen a créixer en amplitud, tot i que no canvia el període.

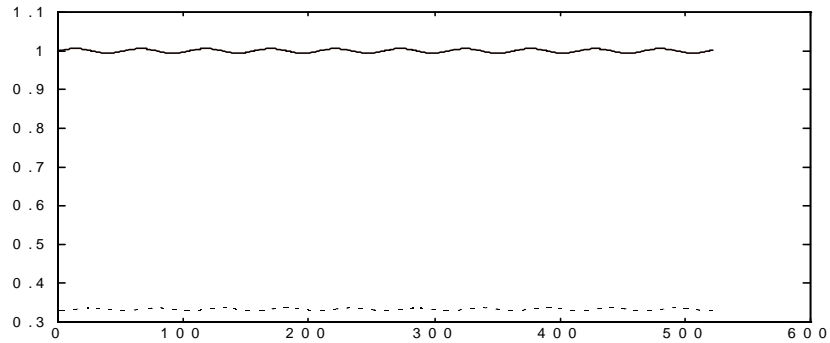


Fig. 6-21 $N_1(0)=1, N(2)=0.33, \varepsilon=0.$

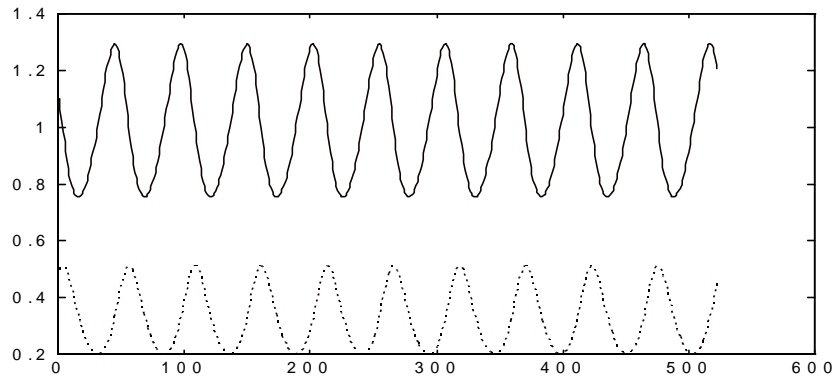


Fig. 6-22 $N_1(0)=1.1, N(2)=0.5, \varepsilon=0.$

- *Model amb pesca moderada.* En aquest cas es pot veure que, en funció de les condicions en què s'introdueix la pesca, els resultats són totalment diferents. Poden aparèixer oscil·lacions si no n'hi ha, poden desaparèixer si n'hi ha, o poden variar d'amplitud depenent del comportament del model abans del començament de la pesca i de l'instant en què comença.

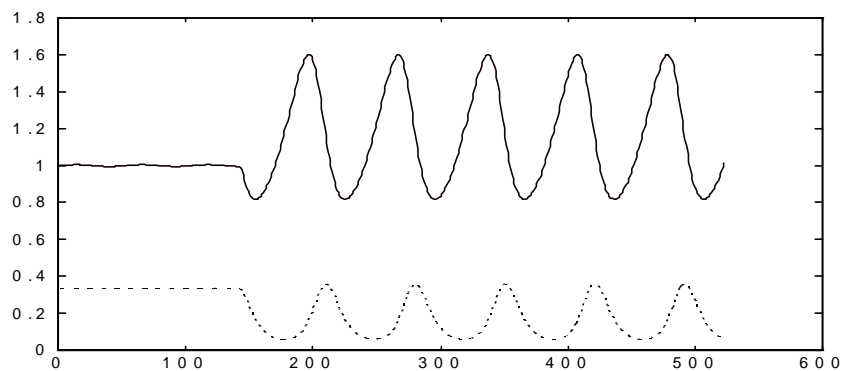


Fig. 6-23 $N_1(0)=1, N(2)=0.33, \varepsilon=0.005$ a partir de $t=1000.$

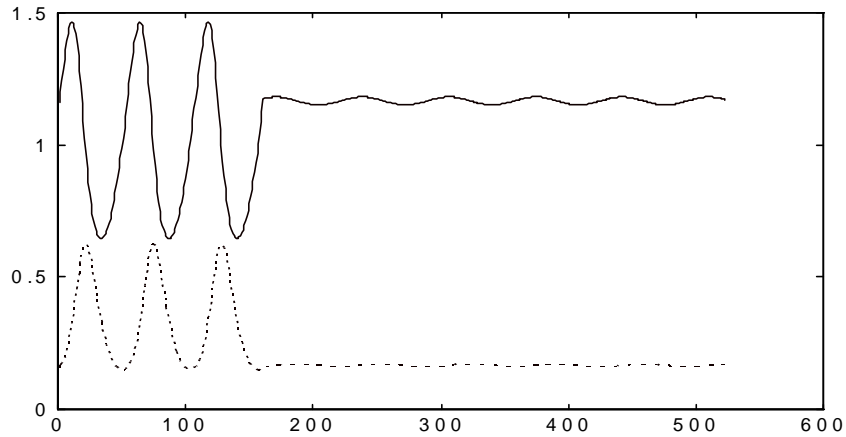


Fig. 6-24 $N_1(0)=1.16$, $N(2)=0.16$, $\varepsilon=0.005$ a partir de $t=1120$.

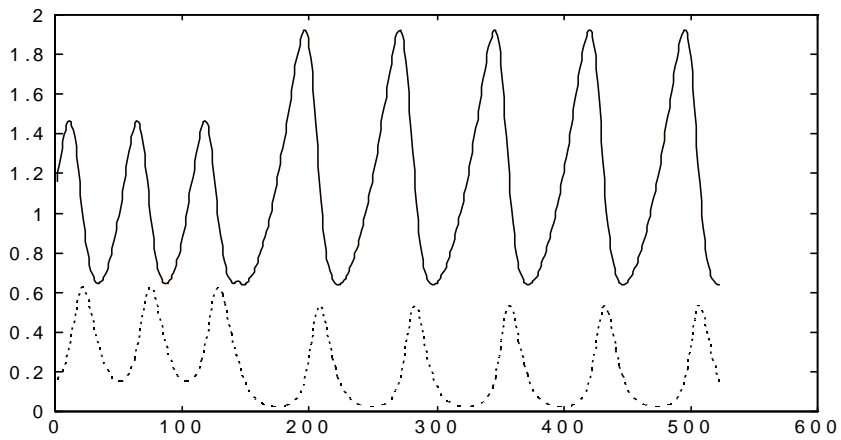


Fig. 6-25 $N_1(0)=1.16$, $N(2)=0.16$, $\varepsilon=0.005$ a partir de $t=1000$.

- *Model amb pesca límit o excessiva.* La intensitat de pesca ε és igual o més gran que el coeficient (a) que representa el ritme de creixement de la població de preses. En aquest cas la població de depredadors desapareix, i la població de preses s'estabilitza en un valor que depèn de les condicions en què s'introdueix la pesca (pesca límit) o també desapareix (en el cas de pesca excessiva).

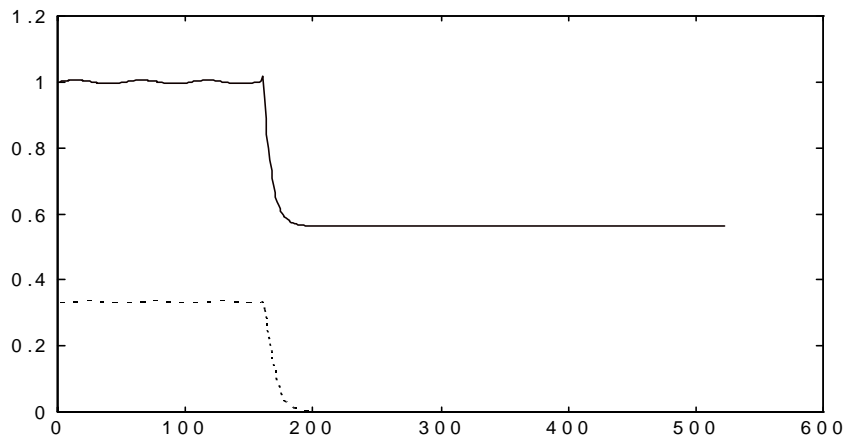


Fig. 6-26 $N_1(0)=1$, $N(2)=0.33$, $\varepsilon=0.01$ a partir de $t=1120$.

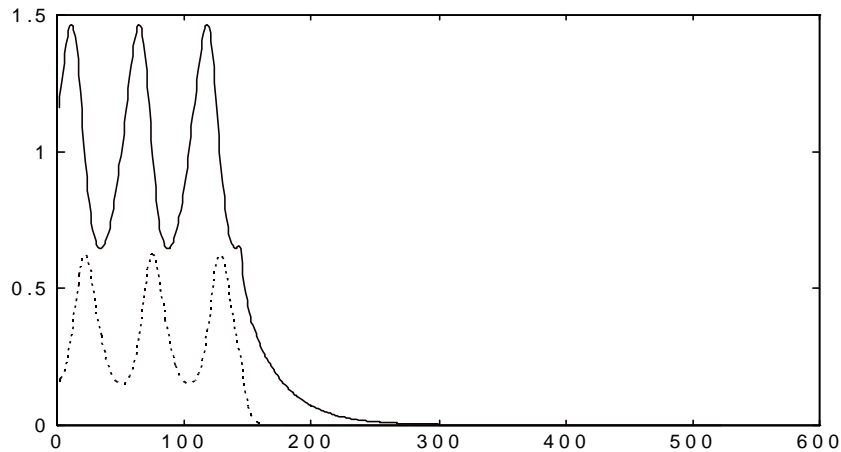


Fig. 6-27 $N1(0)=1.16$, $N(2)=0.16$, $e=0.015$ a partir de $t=1000$.

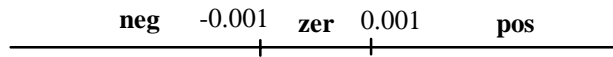
6.3.4 Representació i interpretació dels resultats

En aquesta secció es presenten les representacions dels casos estudiats, que corresponen a diferents condicions inicials i diferents intensitats de pesca a partir de diferents instants de temps. D'aquesta manera, s'ha obtingut un ventall prou ampli de situacions que permet treure conclusions a partir de les representacions obtingudes. En la Taula 6-1 es pot veure la numeració donada a cada cas amb les condicions inicials i les característiques de la pesca en cadascun d'ells. Els intervals característics (Fig. 6-28) són els mateixos per als dos senyals, ja que les variacions són semblants i interessa comparar el comportament dels dos senyals en els mateixos termes, perquè tots dos representen l'evolució de la població d'una espècie de peixos i les variacions en els senyals són semblants en magnitud.

| CAS | $N1(0)$ | $N2(0)$ | ϵ | a partir de (dies) |
|-----------|---------|---------|------------|-----------------------|
| 1 | 1 | 0.33 | 0 | - |
| 2 | 1.16 | 0.16 | 0 | - |
| 3 | 1 | 0.33 | 0.005 | 1120 |
| 4 | 1 | 0.33 | 0.005 | 1000 |
| 5 | 1.16 | 0.16 | 0.005 | 1120 |
| 6 | 1.16 | 0.16 | 0.005 | 1000 |
| 7 | 1 | 0.33 | 0.01 | 1120 |
| 8 | 1 | 0.33 | 0.01 | 1000 |
| 9 | 1.16 | 0.16 | 0.01 | 1120 |
| 10 | 1.16 | 0.16 | 0.01 | 1000 |
| 11 | 1 | 0.33 | 0.015 | 1120 |
| 12 | 1 | 0.33 | 0.015 | 1000 |
| 15 | 1.16 | 0.16 | 0.015 | 1120 |
| 14 | 1.16 | 0.16 | 0.015 | 1000 |

Taula 6-1 Casos estudiats.

Intervals característics per a la primera



Intervals característics per a la segona derivada

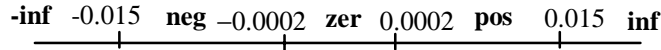


Fig. 6-28 Intervals característics per als dos senyals.

Els límits s'han triat, en aquest cas, de manera experimental a partir de la simple observació de la primera i segona derivades dels senyals en els dos primers casos, en què no hi ha pesca.

A continuació es presenten algunes representacions en forma de taules on, a més de la successió d'episodis de cada representació, es poden veure els instants característics i algunes característiques auxiliars numèriques (durada, màxim, mínim i amplitud). D'aquesta manera, es posa de manifest com i en quins casos poden ser d'utilitat aquestes dades numèriques obtingudes a partir de la representació, a més de la pròpia representació. Tant els instants de temps com les durades estan expressats en setmanes. En les Fig. 6-29 i Fig. 6-30 es pot veure l'estudi detallat d'un dels senyals (N2) per un dels casos estudiats (CAS 4), i a continuació es presenten, en forma de taules comentades, alguns d'aquests casos.

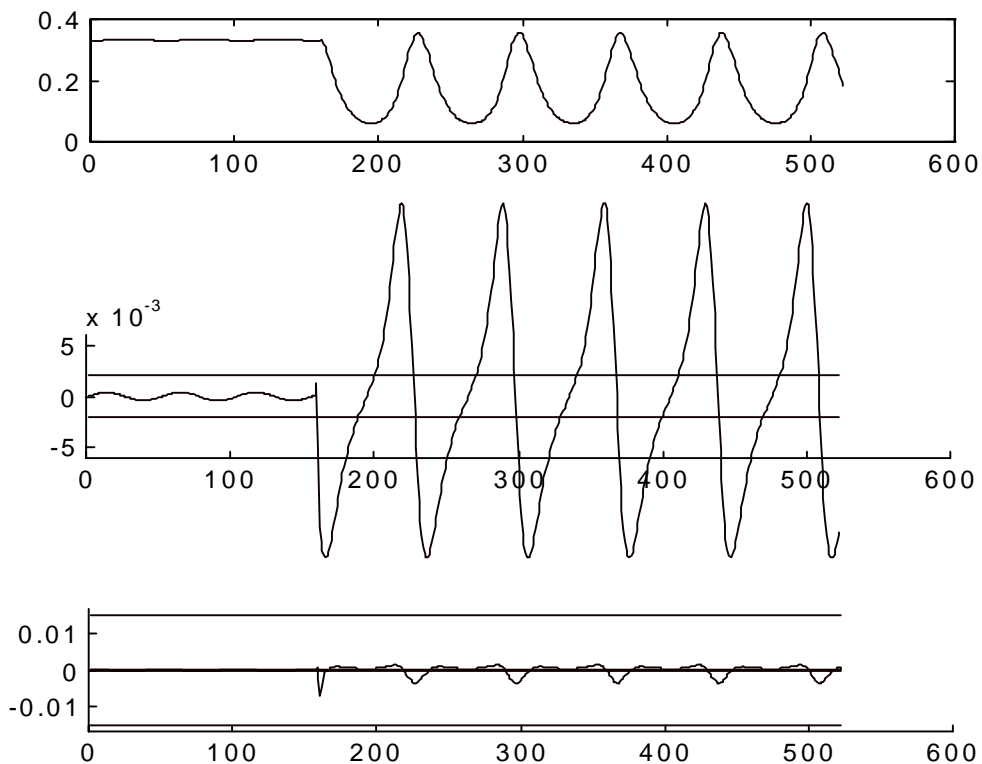


Fig. 6-29 Evolució de la població de depredadors, primera derivada, segona derivada i límits per a $N1(0)=1$, $N2(0)=0.33$ i $\varepsilon=0.005$ a partir de $t=1000$.

| tipus | inici | final | durada | màxim | mínim | amplitud |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----------|
| ∞ | 55 | 56 | 1 | | | |
| ∩ | 56 | 73 | 17 | 1,464 | | 0,289 |
| ∪ | 73 | 108 | 35 | | 0,646 | 0,491 |
| / | 108 | 109 | 1 | | | |
| ∩ | 109 | 126 | 17 | 1,464 | | 0,293 |
| \ | 126 | 127 | 1 | | | |
| ∪ | 127 | 161 | 34 | | 0,646 | 0,458 |
| ⌈ | 161 | 162 | 1 | | | |
| — | 162 | 523 | 361 | 1,182 | 1,151 | 0,022 |

Taula 6-4 CAS 5, N1.

| tipus | inici | final | durada | màxim | mínim | amplitud |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----------|
| \ | 29 | 30 | 1 | | | |
| ∪ | 30 | 68 | 38 | | 0,150 | 0,303 |
| ∩ | 68 | 82 | 14 | 0,626 | | 0,154 |
| \ | 82 | 83 | 1 | | | |
| ∪ | 83 | 121 | 38 | | 0,150 | 0,302 |
| ∩ | 121 | 136 | 15 | 0,627 | | 0,171 |
| ∪ | 136 | 161 | 25 | | 0,150 | 0,059 |
| ⌈ | 161 | 162 | 1 | | | |
| — | 162 | 523 | 361 | 0,172 | 0,161 | 0,010 |

Taula 6-5 CAS 5, N2.

L'aparició de la pesca provoca una estabilització del sistema fent que les oscil·lacions s'esmorteeixin considerablement. En l'instant $t=161$ setmanes en el senyal N1 hi ha una discontinuïtat (\lceil), i en el senyal N2 l'episodi \cup queda retallat (és més curt que els anteriors), i el senyal, després d'un episodi \lceil de transició (amb durada 1) s'estabilitza en un episodi $—$, de la mateixa manera que N1.

6.3.4.3 CAS6 N1(0)=1.16, N2(0)=0.16, $\varepsilon = 0.005$ a partir de $t=1000$ dies

En aquest cas la pesca provoca un creixement en període i amplitud de les oscil·lacions a partir de $t=143$ setmanes. A N1, l'episodi \cup queda interromput (és més curt que els anteriors del mateix tipus) i apareix un episodi \cap de durada 2 que ja indica un canvi en la dinàmica del sistema. A partir d'aquest episodi les oscil·lacions canvien d'amplitud i període; el nou període és aproximadament de 75 setmanes. A N2, l'episodi \cup queda interromput i es converteix en un \cup , a partir del qual comencen les noves oscil·lacions.

El nou període és igualment de 75 setmanes, però en aquest cas cal remarcar que no apareixen episodis \cup , sinó successions $(-)$, cosa que no passa mai en sistemes lineals en què els màxims i mínims relatius coincideixen amb valors extrems de la segona derivada. En aquest cas, l'episodi $-$ té una durada considerable (7 setmanes) que indica un període d'estabilitat abans el senyal no torna a créixer.

| tipus | inici | final | durada | màxim | mínim | amplitud |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----------|
| ⋮ | | | | | | |
| / | 108 | 109 | 1 | | | |
| ∪ | 109 | 126 | 17 | 1,464 | | 0,293 |
| \ | 126 | 127 | 1 | | | |
| ∪ | 127 | 143 | 16 | | 0,646 | 0,087 |
| ∪ | 143 | 145 | 2 | 0,660 | | 0,006 |
| ∪ | 145 | 185 | 40 | | 0,639 | 0,080 |
| / | 185 | 186 | 1 | | | |
| ∪ | 186 | 206 | 20 | 1,926 | | 0,448 |
| ∪ | 206 | 260 | 54 | | 0,639 | 0,776 |
| ⋮ | | | | | | |

Taula 6-6 CAS 6, N1.

| tipus | inici | final | durada | màxim | mínim | amplitud |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----------|
| ⋮ | | | | | | |
| ∪ | 83 | 121 | 38 | | 0,150 | 0,302 |
| ∪ | 121 | 136 | 15 | 0,627 | | 0,171 |
| \ | 136 | 143 | 7 | | | |
| \ | 143 | 145 | 2 | | | |
| \ | 145 | 170 | 25 | | | |
| | 170 | 177 | 7 | | 0,025 | 0,001 |
|) | 177 | 202 | 25 | | | |
| ∪ | 202 | 215 | 13 | 0,536 | | 0,161 |
| \ | 215 | 245 | 30 | | | |
| ⋮ | | | | | | |

Taula 6-7 CAS 6, N2.

6.3.4.4 CAS10 N1(0)=1.16, N2(0)=0.16, $\epsilon = 0.01$ a partir de $t=1000$ dies

Aquest cas correspon a un valor límit de la pesca. El comportament dels dos senyals és semblant al dels casos amb pesca excessiva. L'aparició de la pesca provoca un decreixement en els dos senyals i una posterior estabilització. Això es reflecteix en les representacions en forma d'episodis $(-)$ i $-$. El primer comença en l'instant d'aparició de la pesca i en funció d'aquest instant pot anar precedit d'un episodi de discontinuïtat \lceil .

| tipus | inici | final | durada | màxim | mínim | amplitud |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----------|
| ∴ | 73 | 108 | 35 | | 0,646 | 0,491 |
| ∪ | 108 | 109 | 1 | | | |
| / | 109 | 126 | 17 | 1,464 | | 0,293 |
| ∪ | 126 | 127 | 1 | | | |
| ∪ | 127 | 143 | 16 | | 0,646 | 0,087 |
| ∪ | 143 | 144 | 1 | | | |
| ∪ | 144 | 145 | 1 | | | |
| ∪ | 145 | 163 | 18 | | | |
| | 163 | 523 | 360 | | 0,473 | 0,003 |

Taula 6-8 CAS 10, N1.

| tipus | inici | final | durada | màxim | mínim | amplitud |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----------|
| ∴ | 30 | 68 | 38 | | 0,150 | 0,303 |
| ∪ | 68 | 82 | 14 | 0,626 | | 0,154 |
| ∪ | 82 | 83 | 1 | | | |
| ∪ | 83 | 121 | 38 | | 0,150 | 0,302 |
| ∪ | 121 | 136 | 15 | 0,627 | | 0,171 |
| ∪ | 136 | 143 | 7 | | | |
| ∪ | 143 | 145 | 2 | | | |
| ∪ | 145 | 166 | 21 | | | |
| | 166 | 523 | 357 | | | |

Taula 6-9 CAS 10, N2.

6.3.4.5 Resta de casos

| CAS2 | CAS3 | CAS4 | CAS7 | CAS8 | CAS9 | CAS11 | CAS12 | CAS13 | CAS14 |
|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| ∴ | | | | | ∴ | | | ∴ | ∴ |
| ∪ | ∪ | ∪ | ∪ | ∪ | / | ∪ | ∪ | / | ∪ |
| / | / | / | - | - | ∪ | ∪ | - | ∪ | / |
| ∪ | ∪ | ∪ | | | ∪ | ∪ | | ∪ | ∪ |
| / | / | ∪ | | | ∪ | ∪ | | ∪ | ∪ |
| ∪ | ∪ | / | | | ∪ | ∪ | | ∪ | ∪ |
| ∴ | ∴ | ∴ | | | | | | | |

Taula 6-10 Representació de N1 en la resta de casos.

La resta de casos estudiats es poden comentar en els mateixos termes que els anteriors. L'aparició de la pesca provoca canvis en la dinàmica dels senyals que queden reflectits en les representacions en forma de discontinuïtats, en canvis en la durada de les oscil·lacions (que es poden deduir de les característiques numèriques) o en l'aparició d'episodis d'estabilitat. En les taules que es presenten a continuació es poden observar les representacions dels senyals N1 i N2 en els casos que no s'han comentat anteriorment.

| CAS2 | CAS3 | CAS4 | CAS7 | CAS8 | CAS9 | CAS11 | CAS12 | CAS13 | CAS14 |
|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| ⋮ | — | — | — | — | ⋮ | — | — | ⋮ | ⋮ |
| ∪ |) | ∪ |) |) | ∪ |) |) | ∪ | ∪ |
| ∪ | ∪ | ∪ | ∪ | ∪ | ∪ | ∪ | ∪ | ∪ | ∪ |
| ∪ | ∪ | ∪ | — | ∪ | ∪ | — | — | ∪ | ∪ |
| ∪ | / | ∪ | — | — | ∪ | — | — | ∪ | ∪ |
| ∪ | ∪ | / | | | ∪ | | | ∪ | ∪ |
| ∪ | ∪ | ∪ | | | ∪ | | | ∪ | ∪ |
| ∪ | ⋮ | ∪ | | | ∪ | | | ∪ | ∪ |
| ∪ | | ∪ | | | ∪ | | | ∪ | ∪ |
| ⋮ | | ∪ | | | ∪ | | | ∪ | ∪ |
| ⋮ | | ∪ | | | ∪ | | | ∪ | ∪ |

Taula 6-11 Representació de N2 en la resta de casos

6.4 Conclusions

Els exemples presentats en aquest capítol permeten arribar a la conclusió que es poden fer els mateixos comentaris de cada cas tant observant els senyals com a partir de les representacions. Això indica que les representacions són vàlides per descriure adequadament els senyals, amb l'avantatge que poden ser fàcilment utilitzades per eines de Detecció o Diagnosi com Sistemes Experts o Classificadors.

Els exemples amb senyals que provenen de sistemes lineals, amb un ventall prou ampli de situacions, han permès comprovar que es poden representar adequadament dinàmiques molt diferents. La representació de les discontinuïtats i dels estats estacionaris, dues de les característiques de la nova representació, s'han mostrat com a útils i efectives. En aquests exemples també s'ha pogut comprovar la utilitat de la metodologia per trobar els intervals característics adequats a cada senyal, presentada en el capítol anterior.

En els exemples amb senyals procedents d'un sistema no lineal s'ha comprovat que els canvis en la dinàmica del sistema queden ben representats; aquest fet és important si es té en compte que un dels objectius de la representació és facilitar la Detecció. També s'ha comprovat la utilitat de les característiques auxiliars numèriques.

Cal tenir en compte, però, que en tots aquests exemples s'han utilitzat senyals procedents de simulacions. La problemàtica associada a l'anàlisi de senyals reals és el tema que es tracta en el capítol següent.

7. PROBLEMES DERIVATS DE L'APLICACIÓ A SENYALS REALS

7.1 Introducció

En aquest capítol s'estudia el principal problema que afecta l'anàlisi de senyals reals: la presència de soroll. Tot i que la qualificació en valors característics de la segona derivada ofereix certa robustesa enfront del soroll, hi ha casos en què és necessari algun preprocessament del senyal.

Hi ha molts mètodes per extreure un senyal a partir de dades amb soroll. En les primeres seccions del capítol es mostren alguns d'aquests mètodes i els problemes associats a cadascun d'ells per utilitzar-los conjuntament amb la representació en episodis. A continuació es presenta una solució adequada a les necessitats pròpies de la representació. Finalment, mitjançant un exemple, es pot comprovar la problemàtica associada als senyals reals i la utilitat de la solució proposada.

7.2 Filtratge

La utilització de filtres lineals discrets és, potser, la tècnica més utilitzada. Existeixen un gran nombre de mètodes per dissenyar filtres discrets, en tots els casos cal un coneixement previ del comportament del senyal. Aquest coneixement és incorporat en el filtre en els corresponents paràmetres, que depenen sempre del temps de mostratge.

Cal tenir en compte, però, que el filtratge discret sempre distorsiona, en diferent mesura, el senyal original. Per a l'objectiu final, que és una correcta representació en episodis, aquestes distorsions poden generar nous episodis o fer-ne desaparèixer de significatius. La representació en episodis es fa a partir de la segona derivada del senyal, per tant,

interessa obtenir una segona derivada sense soroll però al mateix temps sense distorsions, cosa difícil d'obtenir utilitzant filtres discrets.

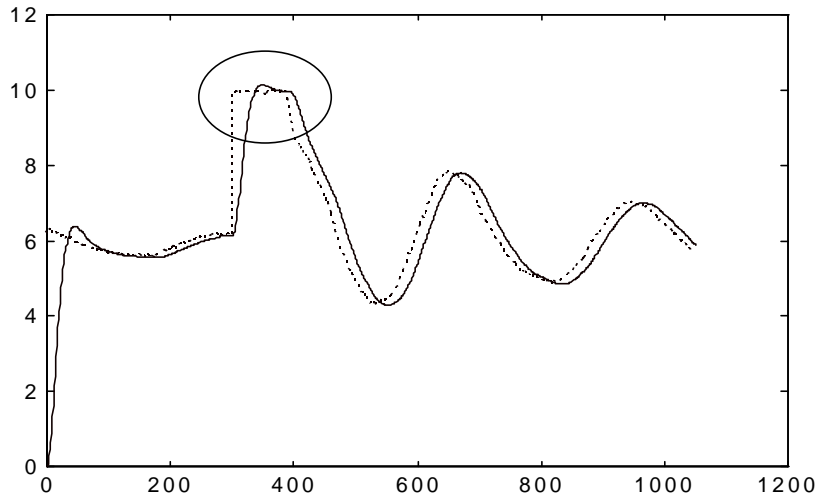


Fig. 7-1 Senyal original i filtrat.

Com a exemple, en les figures Fig. 7-1, Fig. 7-2 i Fig. 7-3 es pot veure el resultat d'aplicar un filtre *Butterworth passa-baix* de segon ordre a un senyal real. El senyal utilitzat en aquest exemple és el mateix que en la resta d'exemples d'aquest capítol. La freqüència de tall del filtre s'ha triat de manera que el soroll en la segona derivada permeti obtenir una bona representació. Es pot observar, però, que tot i que en general es respecta la dinàmica del senyal en els salts es produeixen distorsions que afecten la primera i segona derivades i, com a conseqüència, la representació resultant. Mentre que la representació ideal del salt és $\text{—} \downarrow \uparrow \text{—}$, la representació resultant a partir del senyal filtrat pot ser $\text{—} \downarrow \uparrow \text{—}$ o $\text{—} \downarrow \uparrow \text{—}$ depenent de la tria dels límits; en qualsevol cas, el salt no queda ben representat. Això s'esdevé, en general, en tots els canvis sobtats o salts del senyals representats. Les distorsions en el senyal signifiquen distorsions en la representació corresponent i, com a conseqüència, dificultats en la seva posterior interpretació o utilització.

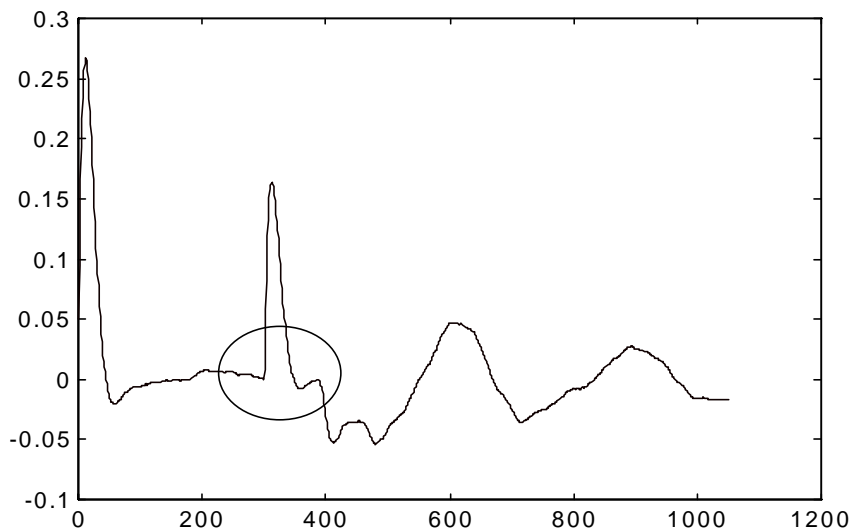


Fig. 7-2 Primera derivada del senyal filtrat.

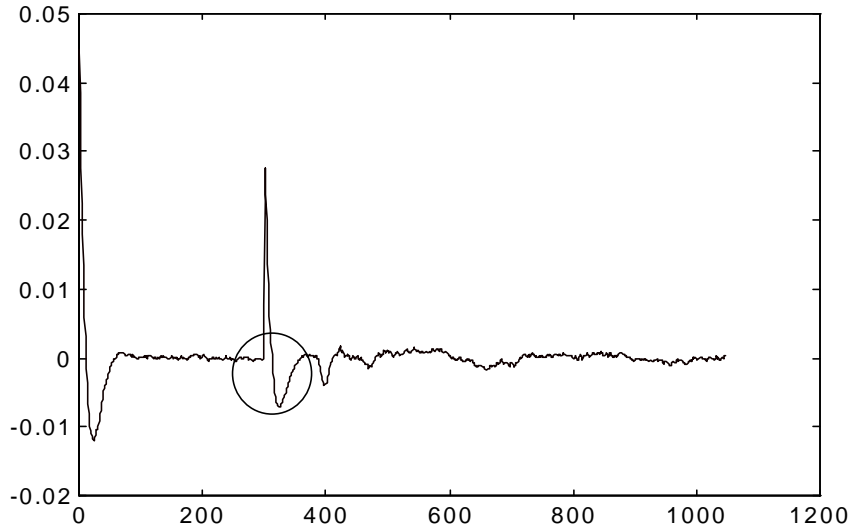


Fig. 7-3 Segona derivada del senyal filtrat.

Tots aquests problemes fan que sigui necessari utilitzar altres mètodes per obtenir la segona derivada a partir de dades sorolloses. L'objectiu és que la representació resultant reflecteixi fidelment la dinàmica del senyal, respectant al màxim el senyal original.

7.3 Altres tècniques

Les solucions que es poden adoptar poden ser de diversa mena. En altres treballs basats en la representació en episodis s'utilitzen diversos mètodes.

A [6,7], tal i com s'ha descrit breument en la secció 4.3, s'utilitza la Transformada Wavelet prèviament a la representació per tal d'obtenir la descomposició del senyal en diverses escales temporals i freqüencials. D'aquesta manera, només cal estudiar aquells components que resultin d'interès, deixant de banda aquells que no aportin cap informació o que dificulten la representació (com és el cas del soroll). Però la utilització de la Transformada Wavelet comporta diversos problemes:

- Pot ser que no totes les variacions interessants del senyal quedin ben reflectides en la mateixa escala. Això fa que s'hagi d'estudiar el comportament a diverses escales per obtenir una bona representació del senyal original, la qual cosa complica el procés.
- L'algorisme ràpid de descomposició comporta la convolució successiva amb diversos filtres per obtenir el component del senyal en l'escala desitjada. Aquestes convolucions successives es poden agrupar en un únic filtre (l'ordre del qual creix exponencialment amb l'escala) que serveixi per trobar directament el component del senyal en l'escala desitjada. Això fa que la transformada wavelet sigui adequada per representar senyals prèviament emmagatzemats, com en el cas de [6,7], però que resulti de difícil aplicació a l'anàlisi de senyals en línia a causa dels retards que comporta l'elevat ordre del filtre que cal aplicar per escales elevades.

Una altra solució és l'adoptada a [82,83], on la identificació dels episodis es contempla com un problema de reconeixement de formes. La utilització de les Xarxes Neurals en aquest camp i en Detecció de fallades ha estat provada [91], i s'ha mostrat com una bona eina. En aquesta representació les Xarxes Neurals s'utilitzen per l'obtenció de les primitives a partir dels valors del senyal en una finestra temporal.

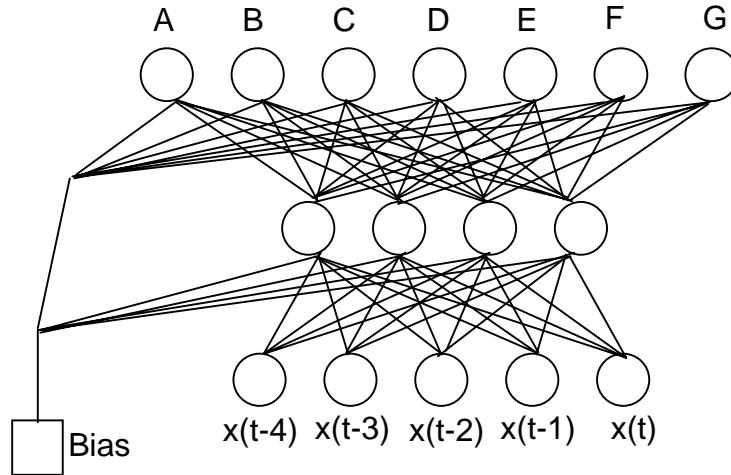


Fig. 7-4 Arquitectura de la xarxa.

En la Fig. 7-4 es pot observar l'arquitectura de la xarxa utilitzada. En la capa d'entrada hi ha cinc elements corresponents als valors del senyal en una finestra de cinc instants de mostratge. La capa intermèdia està composta per quatre elements, i la capa de sortida consta de set elements corresponents a set de les nou primitives. D'aquesta manera, desplaçant la finestra temporal es pot obtenir directament la primitiva a cada instant de mostratge. Aquest mètode presenta diversos problemes, que fan que sigui de difícil utilització en la nova representació proposada:

- És necessari disposar de senyals de mostra per a l'entrenament de la xarxa. Aquests senyals de mostra han de representar bé tots els casos que es volen representar, i s'han d'utilitzar de manera adequada. Això pot comportar un llarg i complicat procés d'aprenentatge. A més, aquest procés d'aprenentatge no és únic, sinó que s'ha de dur a terme per cada senyal que es vol representar.
- El coneixement que es té del senyal no pot ser utilitzat per aquest mètode si no és indirectament, a través dels senyals de mostra utilitzats per a l'entrenament de la xarxa. Per tant, no és possible utilitzar els límits dels intervals característics de la manera que s'ha proposat.
- S'utilitza per al reconeixement de 7 primitives. En la nova representació proposada el conjunt d'episodis és de 13, cosa que donaria lloc a una xarxa molt més complexa.
- La nova classificació d'episodis no es fa a partir de primitives, sinó que utilitza característiques qualitatives dels instants característics que limiten l'episodi. Això fa que resulti impossible aplicar aquest mètode per obtenir la nova representació.

La utilització de finestres temporals és també una tècnica molt utilitzada en el tractament digital del senyal. L'estudi del senyal en una finestra temporal es pot utilitzar de moltes maneres.

L'histograma, descrit en la secció 2.6.3, pot semblar una eina adequada per qualificar la segona derivada en els diferents intervals característics, utilitzant el mode dominant en una finestra temporal triada en funció del soroll. Però el fet que les discontinuïtats es reflecteixin en la segona derivada únicament en un o dos instants de temps consecutius fa impossible aquesta opció, ja que els modes corresponents a valors extrems no podrien aparèixer mai com a mode dominant i, per tant, els episodis corresponents tampoc no apareixerien. Es podria pensar, per solucionar aquests problemes, en alguna modificació, de manera que alguns modes tinguessin més pes que d'altres a l'hora d'obtenir el mode dominant.

Una altre opció, utilitzada freqüentment és, el càlcul de la mitjana o la mediana dels valors del senyal en la finestra per obtenir el valor del senyal filtrat. S'ha demostrat, per exemple, que la mediana és l'estimador òptim del valor d'un senyal quan aquest és constant i el soroll és de distribució exponencial i de mitjana zero [40]. Alguns filtres més sofisticats basats en aquesta idea són el FMH (*finite impulse response median hybrid*) o el *trimming*. En el primer, descrit a [45] i utilitzat a [56], la sortida a cada instant es calcula, utilitzant una finestra de $2k+1$ mostres, a partir de la mediana de tres valors: la mitjana de k mostres anteriors, la mitjana de k mostres posteriors i el valor actual. En el segon, descrit a [79], s'utilitza la mitjana de només les mostres de la finestra més properes a la mediana, amb la qual cosa s'elimina un nombre determinat de valors extrems (els més grans i els més petits).

Amb aquests tipus de filtres s'aconsegueix eliminar els valors aberrants (molt separats dels veïns) i al mateix temps es respecten les discontinuïtats. Però s'ha de tenir en compte que per fer la representació cal obtenir la segona derivada del senyal filtrat. És per aquest motiu que els filtres basats en la mediana no es poden utilitzar, ja que, si bé filtren el senyal, la primera i segona derivades del senyal resultant poden quedar encara més distorsionades, com es pot veure en les figures Fig. 7-5 i Fig. 7-6 . Tampoc no es poden aplicar directament sobre la segona derivada, ja que les discontinuïtats serien interpretades com a valors aberrants i, per tant, eliminades. La mitjana ofereix, en aquest aspecte, un comportament més robust, si bé els efectes sobre les derivades tampoc són els desitjables (Fig. 7-7).

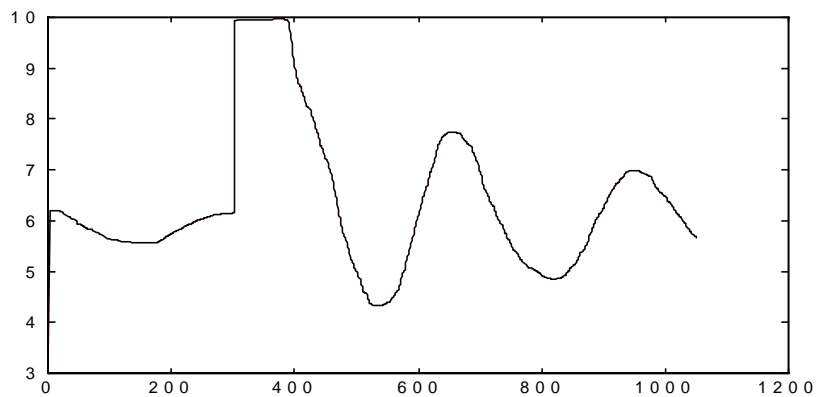


Fig. 7-5 Senyal filtrat utilitzant la mediana en una finestra de 30 punts.

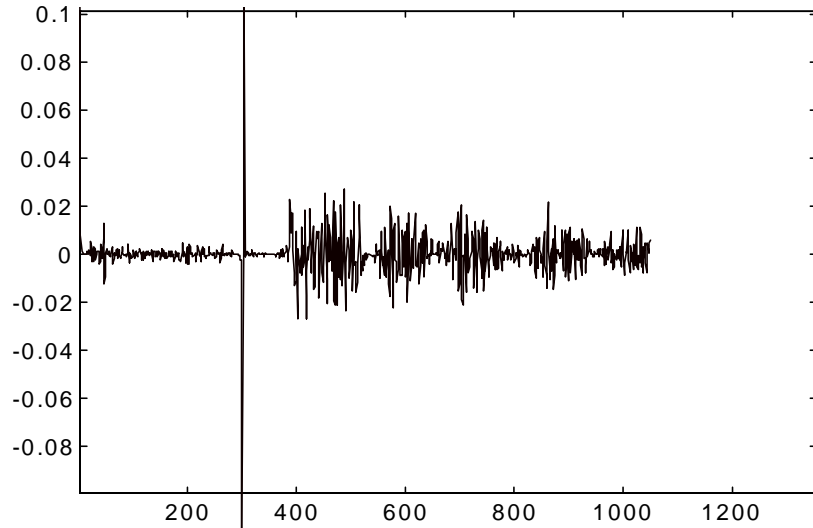


Fig. 7-6 Segona derivada del senyal de la Fig. 7-5.

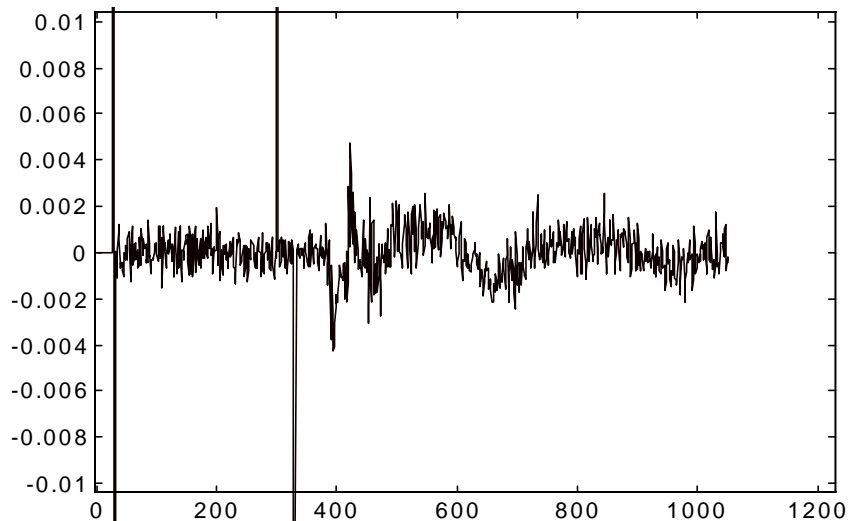


Fig. 7-7 segona derivada del senyal filtrat utilitzant la mitjana en una finestra de 30 punts.

7.4 Estimació de la segona derivada

Per resoldre aquests problemes es pot pensar en algun tipus de tractament específic per a la segona derivada. Utilitzant la mateixa filosofia de finestres lliscants, la solució proposada i utilitzada és la següent:

- Aproximar el senyal contingut en la finestra per una funció de segon ordre mitjançant el mètode de mínims quadrats. Per a una finestra de n mostres, a l'instant t_i disposem dels n instants de temps $(t_{i-n+1}, t_{i-n+2}, \dots, t_i)$ i dels valors del senyal en aquests instants de temps $(x(t_{i-n+1}), x(t_{i-n+2}), \dots, x(t_i))$. Amb aquestes dades es pot trobar la paràbola que s'ajusta més bé a aquests valors. El resultat seran els coeficients de la funció de segon ordre:

$$\hat{x}(t) = a_i t^2 + b_i t + c_i$$

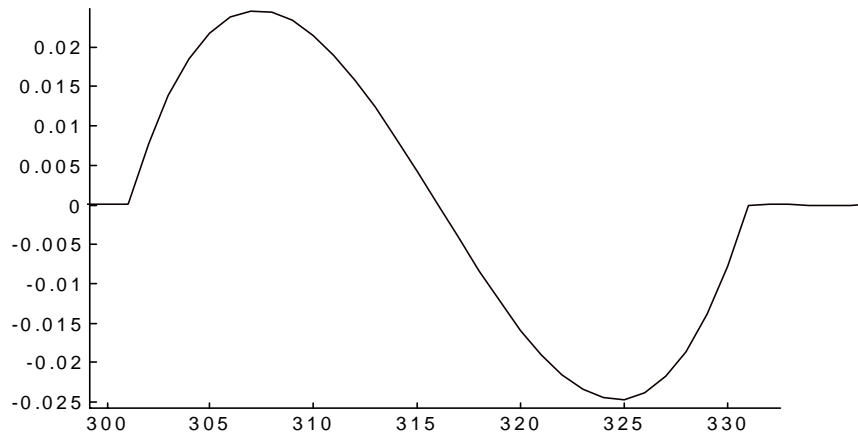


Fig. 7-9 Estimació de la segona derivada en un salt en el senyal original.

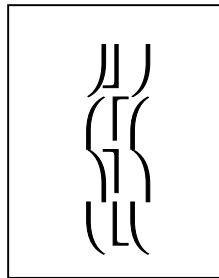


Fig. 7-10 Seqüències de discontinuïtat.

Cal dir que poden aparèixer problemes si es produeixen salts consecutius amb una separació en el temps menor a la durada de la finestra. En aquests casos el resultat no és el desitjat. Per evitar aquests problemes cal arribar a un compromís; cal triar una durada adequada de la finestra, de manera que s'elimini el soroll tant com sigui possible sense que el resultat (l'estimació de la segona derivada) quedi falsejat.

7.5 Estimació del senyal i de la primera derivada

Per fer la representació en episodis d'un senyal és necessari disposar, a més de la segona derivada, que és fonamental, dels valors de la primera derivada i del senyal en els extrems de l'episodi. La primera derivada s'utilitza per determinar el tipus d'episodi, i el valor senyal és necessari per al càlcul d'algunes característiques auxiliars numèriques que poden ser de molta utilitat.

Per això és necessària una estimació també d'aquests dos valors, la qual s'ha de realitzar d'acord amb l'estimació feta per la segona derivada. S'ha de fer de manera que els retards siguin els mateixos en les tres estimacions. També s'ha d'aconseguir que les distorsions ocasionades en la segona derivada quedin reflectides d'alguna manera en el senyal i en la primera derivada. Però no cal que sigui d'una manera exacta, sinó d'una manera efectiva per a l'objectiu final, que és la representació en episodis. Les tres estimacions han de ser qualitativament coherents, encara que no ho siguin quantitativament.

A continuació es presenten tres propostes ; una d'aquestes es pot descartar totalment, la segona no s'ajusta totalment a les exigències i la tercera s'ha considerat correcte i és la utilitzada.

- a) **Integració numèrica de l'estimació de la segona derivada.** Integrant numèricament la segona derivada es pot estimar la primera derivada, i tornant a fer el mateix es pot estimar el valor del senyal a cada instant.

$$\frac{\hat{dx}}{dt}(t_i) = \frac{\hat{dx}}{dt}(t_{i-1}) + \frac{\hat{d^2x}}{dt^2}(t_i) \cdot (t_i - t_{i-1})$$

$$\hat{x}(t_i) = \hat{x}(t_{i-1}) + \frac{\hat{dx}}{dt}(t_i) \cdot (t_i - t_{i-1})$$

Però amb aquest mètode els errors comesos en l'estimació de la segona derivada s'acumulen en l'estimació de la derivada i del senyal, cosa que dóna com a resultat grans errors , com es pot veure en l'exemple de la Fig. 7-11. Per aquest motiu es pot descartar aquest mètode.

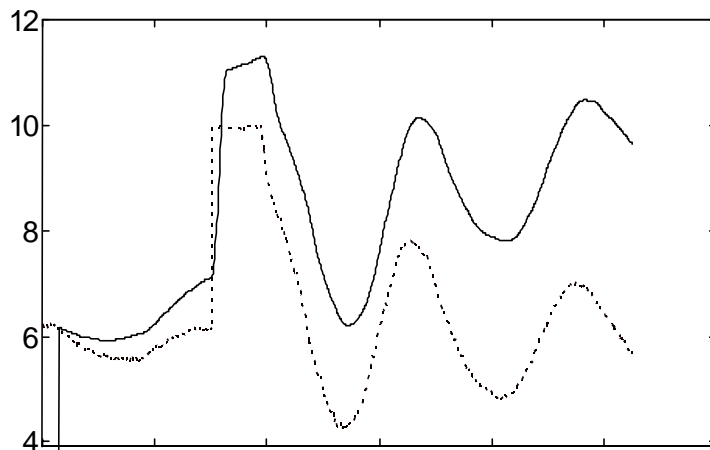


Fig. 7-11 Senyal original i estimació feta utilitzant la integració numèrica de l'estimació de la segona derivada.

- b) **Estimació a partir de la paràbola.** Per fer l'estimació de la segona derivada s'aproxima el senyal en la finestra per una paràbola:

$$\hat{x}(t) = a_i t^2 + b_i t + c_i$$

aquesta aproximació es pot fer servir per calcular el senyal i la primera derivada a cada instant de temps:

$$\hat{x}(t_i) = a_i t_i^2 + b_i t_i + c_i$$

$$\frac{\hat{dx}}{dt}(t_i) = 2a_i t_i + b_i$$

Aquest mètode comporta alguns problemes, il·lustrats en les Fig. 7-12 i Fig. 7-13. El fet d'aproximar per una paràbola provoca distorsions en el senyal i en la primera derivada, que, en els salts, es transformen en sobrepics, la qual cosa fa que els valors estimats s'allunyin considerablement dels que es podrien considerar correctes. Aquest efecte es produeix tant en el senyal com en la primera derivada i pot donar lloc a representacions incorrectes.

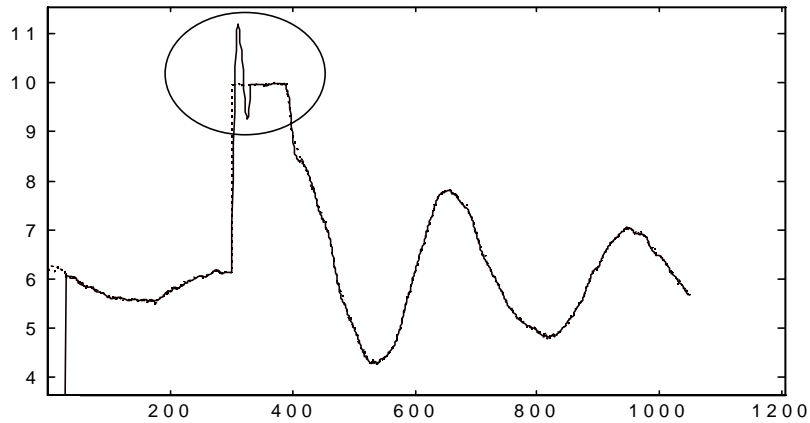


Fig. 7-12 Senyal original i estimat.

Al mateix temps, no existeix cap retard entre el senyal original i l'estimació, a diferència del que succeeix en la segona derivada. El mateix passa amb la primera derivada; el retard en l'estimació no és el mateix que en l'estimació de la segona derivada. Aquesta manca de sincronització entre els tres valors també pot ocasionar problemes en la determinació del tipus d'episodi i en el càlcul de les característiques numèriques.

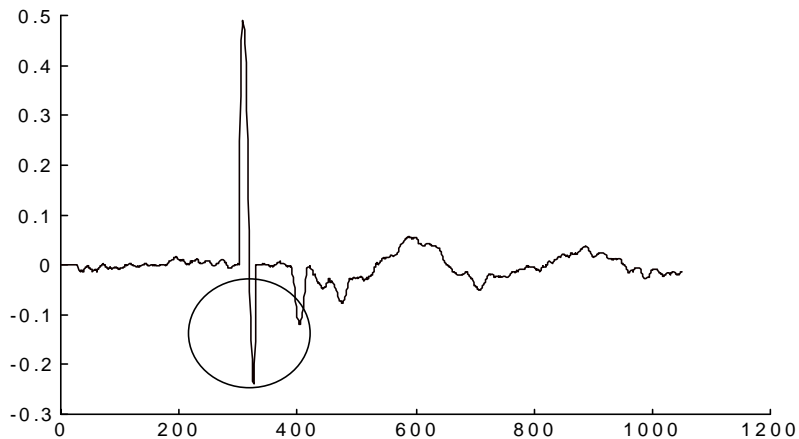


Fig. 7-13 Estimació de la derivada.

Per intentar minimitzar aquests problemes es pot fer l'estimació utilitzant l'instant de temps mitjà de la finestra:

$$\hat{x}(t_i) = a_i t_k^2 + b_i t_k + c_i$$

$$\frac{\hat{dx}}{dt}(t_i) = 2a_i t_k + b_i$$

on $k = i - \frac{n-1}{2}$ i n és el número de punts de la finestra. D'aquesta manera, se soluciona el problema del retard, però les distorsions, tot i que es redueixen, encara són presents (Fig. 7-14). Això fa desaconsellable utilitzar aquest mètode, pel fet, ja comentat, que aquestes distorsions poden quedar reflectides en els episodis i , per tant, donar lloc a una mala representació del senyal original.

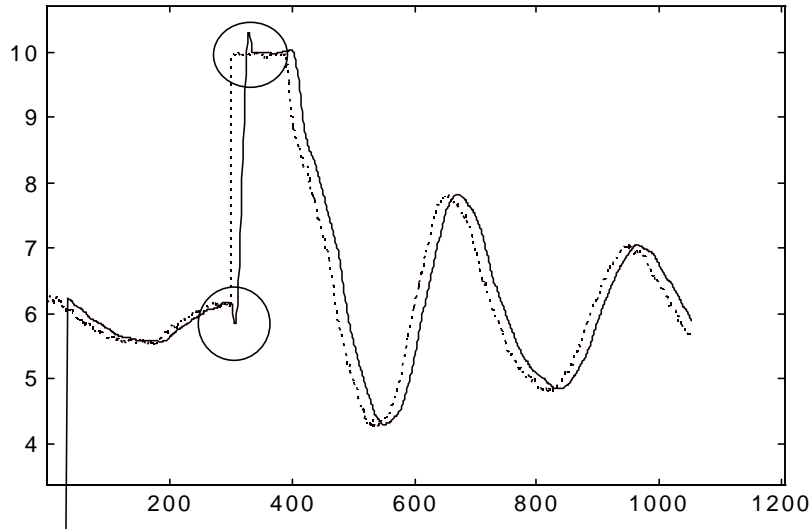


Fig. 7-14 Senyal original i estimat.

- c) **Estimació utilitzant altres aproximacions en la mateixa finestra.** De la mateixa manera que s'aproximen els punts de la finestra per una paràbola per estimar la segona derivada, es poden aproximar per una recta per trobar la primera derivada, o es pot utilitzar la mitjana per fer l'estimació del valor del senyal. Això permet fer una estimació d'aquests dos valors a cada instant de temps. Per una finestra de n mostres, a l'instant t_i disposem dels n instants de temps (t_{i-n+1} , t_{i-n+2} , ..., t_i) i dels valors del senyal en aquests instants de temps ($x(t_{i-n+1})$, $x(t_{i-n+2})$, ..., $x(t_i)$). Amb aquestes dades es pot trobar la recta que millor s'ajusta a aquests valors. Els resultats seran el pendent de la recta i el terme independent:

$$\hat{x}(t) = m_i t + r_i$$

l'estimació de la derivada ve donada pel pendent de la recta:

$$\frac{\hat{d}x}{dt}(t_i) = m_i$$

D'una manera semblant es pot trobar l'estimació del valor del senyal a l'instant t_i :

$$\hat{x}(t_i) = \frac{\sum_{k=i-n+1}^i x(t_k)}{n}$$

Els resultats d'aquest mètode aplicat al senyal de l'exemple es poden veure en les figures Fig. 7-15 i Fig. 7-16.

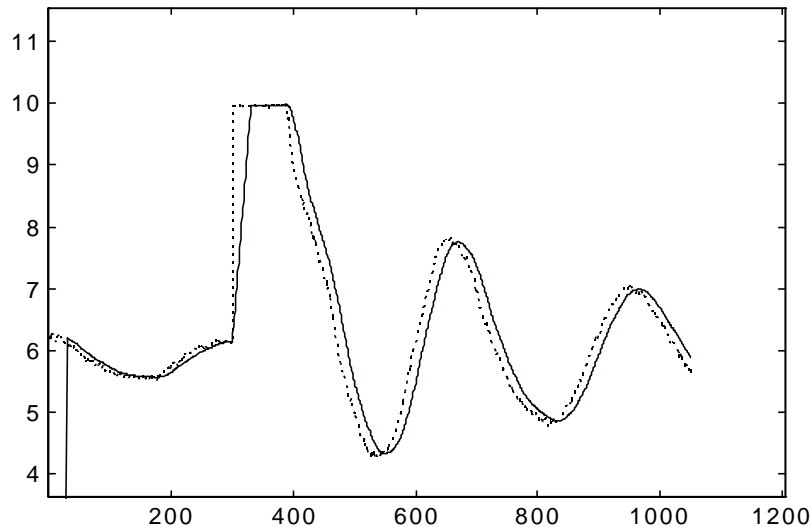


Fig. 7-15 Senyal original i estimat.

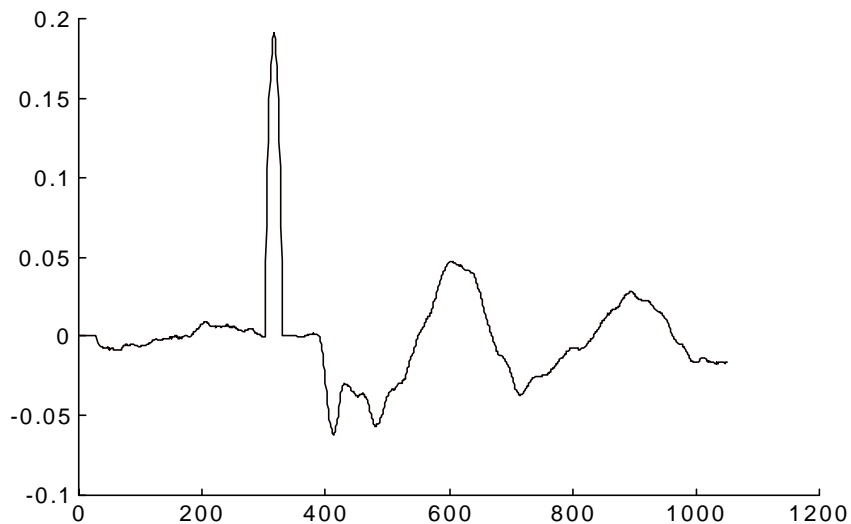


Fig. 7-16 Estimació de la primera derivada.

Aquest mètode presenta importants avantatges respecte als anteriors:

- els retards produïts en les tres estimacions són iguals, fet que facilita la posterior utilització d'aquestes dades per a la determinació dels episodis. Aquesta afirmació es demostra en la secció 7.6.
- Tot i que quantitativament es pot dir que les estimacions no són coherents, sí que ho són qualitativament. La derivada del senyal estimat no és igual a l'estimació de la derivada, i el mateix passa per la segona derivada. Però es pot afirmar que qualitativament són correctes; els canvis qualitius en l'estimació de la segona derivada representen canvis qualitius en l'estimació de la primera derivada i

aquests, al mateix temps, canvis en l'estimació del senyal. Com a conseqüència no es provoquen distorsions en la representació del senyal, excepte els ja comentats en els salts.

- Els valors estimats sempre estan entre els valors màxim i mínim de la finestra, tant per al senyal com per a la primera derivada. Per tant, no es produeixen sobrepics afegits ni es generen noves oscil·lacions en les estimacions. Això assegura que en la representació no apareguin falses característiques (qualitatives o quantitatives) en els episodis.

En les figures Fig. 7-17 i Fig. 7-18 es pot observar el detall de les estimacions per un salt en el senyal original. Evidentment l'estimació de la derivada no és la derivada del senyal estimat, però es pot afirmar que la representa qualitativament. El mateix es pot dir amb l'estimació de la segona derivada (Fig. 7-9).

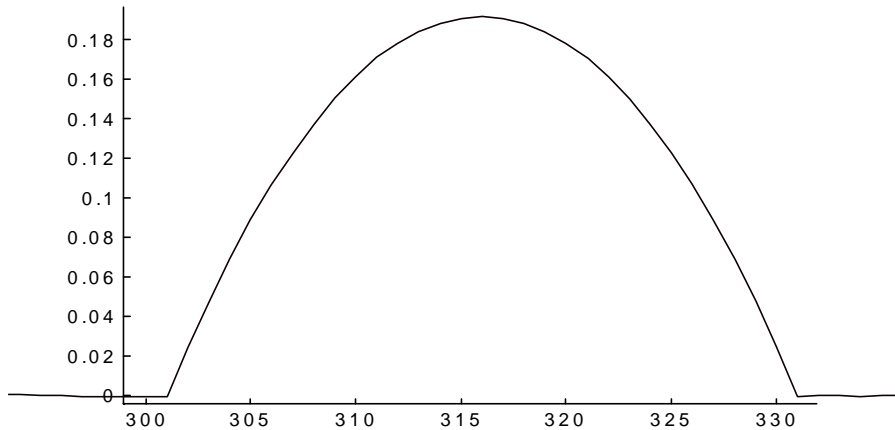


Fig. 7-17 Estimació de la primera derivada en un salt en el senyal original.

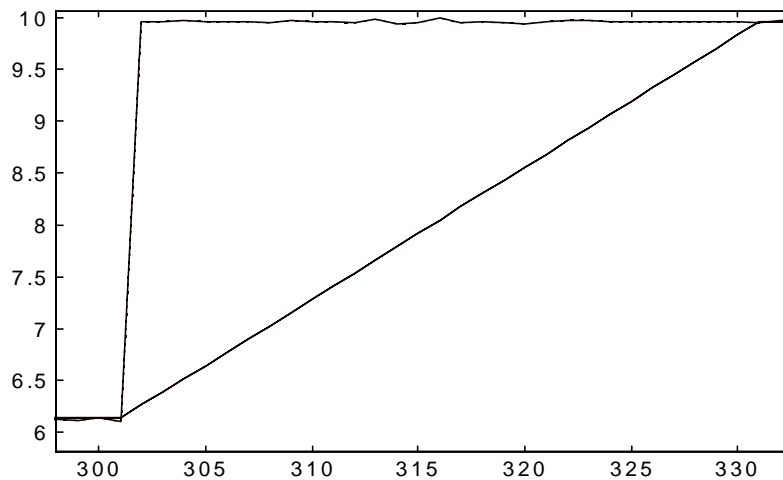


Fig. 7-18 Estimació del senyal en un salt en el senyal original.

En resum, es pot dir que d'aquesta manera s'aconsegueix mantenir les característiques importants del comportament del senyal al mateix temps que s'elimina el soroll. En els casos extrems, com són els salts en el senyal o en la primera derivada, l'efecte que es produeix és una dilatació temporal del salt. Aquesta deformació, que depèn de la durada

de la finestra, es produeix en el senyal i en les derivades, de manera que, qualitativament, queden afectades de la mateixa manera.

7.6 L'aproximació per mínims quadrats com a filtre FIR

En les seccions anteriors s'ha proposat l'aproximació per mínims quadrats com a eina per estimar el senyal i la primera i segona derivades. En aquesta secció es mostra com aquestes aproximacions es poden expressar, per qualsevol derivada, en forma de filtres de resposta impulsional finita (FIR) amb resposta de fase lineal.

Per calcular el senyal (derivada zero) s'aproxima el senyal per la mitjana (polinomi de grau zero); per calcular la primera derivada s'aproxima per una recta i per la segona derivada per una paràbola. En general, per calcular la n-èsima derivada es pot aproximar el senyal per mínims quadrats per un polinomi de grau n . Si $a_0, a_1 \dots a_n$ són els coeficients del polinomi pel qual s'aproxima el senyal, l'aproximació vindrà donada per:

$$\hat{x}(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n$$

i la n-èsima derivada per:

$$\frac{d^n \hat{x}(t)}{dt^n} = n! a_n$$

El problema es redueix a trobar a_n mitjançant l'aproximació del senyal per mínims quadrats. Considerant que s'utilitza una finestra de f punts, si anomenem $x_1, x_2 \dots x_f$ als valors del senyal en els instants $t_1, t_2 \dots t_f$, la solució del problema dels mínims quadrats ve donada per:

$$A = \begin{bmatrix} t_1^0 & t_1^1 & \dots & t_1^n \\ t_2^0 & t_2^1 & \dots & t_2^n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_f^0 & t_f^1 & \dots & t_f^n \end{bmatrix}, \quad a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_f \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} Aa &= x \\ A^T Aa &= A^T x \\ a &= (A^T A)^{-1} A^T x \end{aligned}$$

A més, considerant que el senyal que volem filtrar està uniformement mostrejat i que la n-èsima derivada ($n!a_n$) es considera constant per tots els instants de temps de la finestra, es pot triar, per comoditat:

$$A = \begin{bmatrix} 1^0 & 1^1 & \dots & 1^n \\ 2^0 & 2^1 & \dots & 2^n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f^0 & f^1 & \dots & f^n \end{bmatrix}_{f \times (n+1)}$$

$$A_{ij} = i^{j-1}$$

Amb aquesta tria de la matriu A es considera que el temps de mostreig és igual a 1; per tant, els resultats obtinguts a partir d'aquí hauran de ser adaptats per temps de mostreig diferents. Amb la matriu A considerada, la matriu $P=A^T A$ es pot obtenir de la següent manera:

$$P = A^T A = \begin{bmatrix} f & \sum_{k=1}^f k & \dots & \sum_{k=1}^f k^n \\ \sum_{k=1}^f k & \sum_{k=1}^f k^2 & \dots & \sum_{k=1}^f k^{n+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum_{k=1}^f k^n & \sum_{k=1}^f k^{n+1} & \dots & \sum_{k=1}^f k^{2n} \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)}$$

$$P_{ij} = \sum_{k=1}^f k^{i+j-2}$$

Aleshores,

$$a = (P^{-1} A^T) x$$

$$a_l = \sum_{i=1}^f (P^{-1} A^T)_{l+1,i} x_i$$

i, tenint en compte que:

$$A_{ij}^T = j^{i-1}$$

obtenim:

$$(P^{-1} A^T)_{ij} = \sum_{k=1}^{n+1} P_{ik}^{-1} A_{kj}^T = \sum_{k=1}^{n+1} P_{ik}^{-1} j^{k-1}$$

Per tant:

$$a_l = \sum_{i=1}^f \left(\sum_{k=1}^{n+1} P_{l+1,k}^{-1} i^{k-1} \right) x_i$$

i el coeficient a_n i la n -èsima derivada vindran donats per:

$$a_n = \sum_{i=1}^f \left(\sum_{K=1}^{n+1} P_{n+1,k}^{-1} i^{k-1} \right) x_i$$

$$\frac{d^n \hat{x}(t)}{dt^n} = n! a_n = n! \sum_{i=1}^f \left(\sum_{K=1}^{n+1} P_{n+1,k}^{-1} i^{k-1} \right) x_i$$

Per tant, l'estimació de la n-èsima derivada per mínims quadrats es pot trobar aplicant un filtre FIR ($h(i)$) al senyal. Formulats en la notació utilitzada en tractament digital del senyal, els coeficients $h(i)$ del filtre es poden posar com a:

$$h(i) = n! \left(\sum_{K=1}^{n+1} P_{n+1,k}^{-1} (f-i)^{k-1} \right) \quad i = 0, \dots, f-1$$

i l'estimació de la n-èsima derivada per mínims quadrats en un instant k es podrà trobar de la següent manera:

$$\frac{d^n \hat{x}(k)}{dt^n} = \sum_{i=0}^{f-1} h(i) x(k-i)$$

on:

$h(i) \quad i = 0, \dots, f-1$ és la resposta impulsional del filtre

$\frac{d^n \hat{x}(k)}{dt^n}$ és l'estimació de la n-èsima derivada en l'instant k

$x(k)$ és el valor del senyal en l'instant k

i $H(z) = \sum_{i=0}^{f-1} h(i) z^{-i}$ és la transformada z del filtre

Els coeficients $h(i)$ del filtre depenen de n (ordre de la derivada) i de f (longitud del filtre), i la manera de calcular-los és a partir de la matriu P corresponent als valors de n i f . A continuació es presenten les matrius P i P^{-1} per $n = 0, 1$ i 2 i en funció de f ; aquests valors de n són els que s'han utilitzat en les seccions anteriors. En cada cas es troben també els coeficients del filtre en funció de f ; d'aquesta manera es poden demostrar algunes propietats.

- **n=0** (estimació del senyal)

$$P = f$$

$$P^{-1} = \frac{1}{f}$$

en aquest cas

$$h(i) = 0! \frac{1}{f} (f-i)^0 = \frac{1}{f} \quad i = 0, \dots, f-1, \quad f > 0$$

que correspon a la mitjana del senyal, com era d'esperar. Tots els coeficients del filtre són iguals.

- **n=1** (primera derivada)

$$P = \begin{bmatrix} f & \frac{(f+1)^2 - f - 1}{2} \\ \frac{(f+1)^2 - f - 1}{2} & \frac{2(f+1)^3 - 3(f+1)^2 + f + 1}{6} \end{bmatrix}$$

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} 2 \frac{2f+1}{f(f-1)} & -\frac{6}{f(f-1)} \\ -\frac{6}{f(f-1)} & \frac{12}{f(f^2-1)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} h(i) &= 1! \left(\sum_{k=1}^2 P_{2k}^{-1} (f-i)^{k-1} \right) = \left(-\frac{6}{f(f-1)} + \frac{12(f-i)}{f(f^2-1)} \right) = \\ &= \left(\frac{12(f-i) - 6(f+1)}{f(f^2-1)} \right) \quad i = 0, \dots, f-1 \quad f > 1 \end{aligned}$$

Es pot comprovar que h té simetria negativa:

$$\begin{aligned} h(f-i-1) &= \left(\frac{12(i+1) - 6(f+1)}{f(f^2-1)} \right) = \left(\frac{6(f+1) - 12(f-i)}{f(f^2-1)} \right) = \\ &= -\left(\frac{12(f-i) - 6(f+1)}{f(f^2-1)} \right) = -h(i) \quad i = 0, \dots, f-1 \quad f > 1 \end{aligned}$$

- **n=2** (segona derivada)

$$P = \begin{bmatrix} f & \frac{(f+1)^2 - f - 1}{2} & \frac{2(f+1)^3 - 3(f+1)^2 + f + 1}{6} \\ \frac{(f+1)^2 - f - 1}{2} & \frac{2(f+1)^3 - 3(f+1)^2 + f + 1}{6} & \frac{(f+1)^4 - 2(f+1)^3 + (f+1)^2}{4} \\ \frac{2(f+1)^3 - 3(f+1)^2 + f + 1}{6} & \frac{(f+1)^4 - 2(f+1)^3 + (f+1)^2}{4} & \frac{6(f+1)^5 - 15(f+1)^4 + 10(f+1)^3 - f - 1}{30} \end{bmatrix}$$

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} 3 \frac{3f^2 + 3f + 2}{f(f^2 - 3f + 2)} & -18 \frac{2f + 1}{f(f^2 - 3f + 2)} & \frac{30}{f(f^2 - 3f + 2)} \\ -18 \frac{2f + 1}{f(f^2 - 3f + 2)} & 12 \frac{16f^2 + 30f + 11}{f(f^4 - 5f^2 + 4)} & -\frac{180}{f(f^3 - f^2 - 4f + 4)} \\ \frac{30}{f(f^2 - 3f + 2)} & -\frac{180}{f(f^3 - f^2 - 4f + 4)} & \frac{180}{f(f^4 - 5f^2 + 4)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} h(i) &= 2! \left(\sum_{k=1}^3 P_{3k}^{-1} (f-i)^{k-1} \right) = 2! \left(\frac{30}{f(f^2 - 3f + 2)} - \frac{180(f-i)}{f(f^3 - f^2 - 4f + 4)} + \frac{180(f-i)^2}{f(f^4 - 5f^2 + 4)} \right) = \\ &= 60 \frac{(f+1)(f+2) - 6(f+1)(f-i) + 6(f-i)^2}{f(f^4 - 5f^2 + 4)} = \\ &= 60 \frac{(f+1)(f+2) - 6(f-i)(i+1)}{f(f^4 - 5f^2 + 4)} \quad i = 0, \dots, f-1 \quad f > 2 \end{aligned}$$

En aquest cas, es pot comprovar que $h(f-i-1)=h(i)$; per tant, el filtre té simetria positiva:

$$\begin{aligned} h(f-i-1) &= 60 \frac{(f+1)(f+2) - 6(f-f+i+1)(f-i-1+1)}{f(f^4 - 5f^2 + 4)} = \\ &= 60 \frac{(f+1)(f+2) - 6(f-i)(i+1)}{f(f^4 - 5f^2 + 4)} = h(i) \quad i = 0, \dots, f-1 \quad f > 2 \end{aligned}$$

Les propietats de simetria dels filtres trobats fan que tots tinguin resposta de fase lineal. Això comporta que aquestes famílies de filtres tinguin totes les propietats derivades d'aquesta característica, molt important en filtres FIR. Una d'aquestes propietats és que el *retard de grup* (T_g), en instants de mostreig, és constant per a cada filtre i depèn només del nombre de coeficients del filtre (f) [46]:

$$T_g = \frac{f-1}{2}$$

Per tant, independentment de n , el mateix nombre de coeficients (f) comporta el mateix retard en el senyal. En altres paraules, si el nombre de mostres utilitzades per estimar el senyal, la primera derivada i la segona derivada són iguals, aleshores el retard produït en els tres casos serà el mateix.

7.7 Exemple d'aplicació: Detecció i Diagnosi de fallades en una planta de laboratori

En aquest exemple s'utilitza la representació en episodis per detectar fallades en una planta de laboratori. En un primer estudi, sense filtratge del soroll, es posen de manifest les mancances de la representació quan s'aplica a senyals sorollosos i, al mateix temps, el grau de robustesa que pot oferir en aquests casos. A continuació es refà l'estudi

incloent-hi el filtratge del soroll presentat en les seccions anteriors, d'aquesta manera es poden veure les millores introduïdes en la representació gràcies al filtrat.

La planta de laboratori on s'han de detectar les fallades és un sistema de dos dipòsits units per dos tubs, tal i com es pot veure en la Fig. 7-19. En un dels tubs de connexió hi ha una vàlvula (V1). El segon dipòsit perd líquid a través d'una altra vàlvula (V2). Aquestes dues vàlvules són tot o res, és a dir, només poden estar completament obertes o completament tancades.

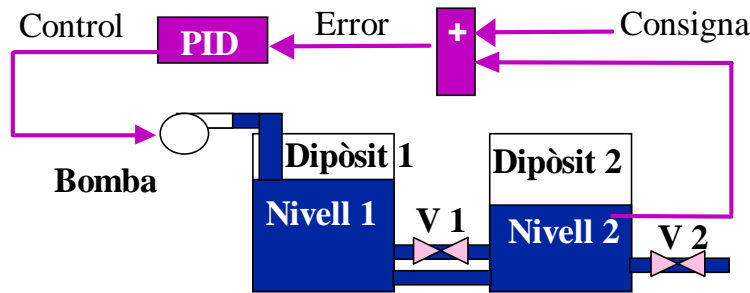


Fig. 7-19 Planta de laboratori.

L'objectiu de control és mantenir el nivell en el segon dipòsit actuant sobre la bomba que subministra líquid al primer dipòsit. Els senyals de què es disposa són la mesura de nivell del Dipòsit 2, la tensió aplicada a la bomba (que és el senyal de Control) i la Consigna. Es considera que el procés funciona correctament quan les dues vàlvules són obertes i el control funciona correctament.

Per tal de provar la utilitat de la representació, aquesta eina s'aplica a senyals corresponents al Nivell 2 i al Control amb l'objectiu de distingir entre quatre possibles situacions:

1. Situació normal
2. Vàlvula 1 tancada
3. Vàlvula 2 tancada
4. Canvi de consigna (positiu o negatiu)

7.7.1 Detecció sense filtratge del soroll

En condicions normals, amb el nivell 2 en règim permanent, una petita oscil·lació i un cert nivell de soroll apareixen en els senyals (Fig. 7-20). Per tant, els límits dels intervals característics s'han triat per detectar un episodi de tipus – en aquest cas. Els valors dels límits triats són els que es poden veure en les figures Fig. 7-22 i Fig. 7-23.

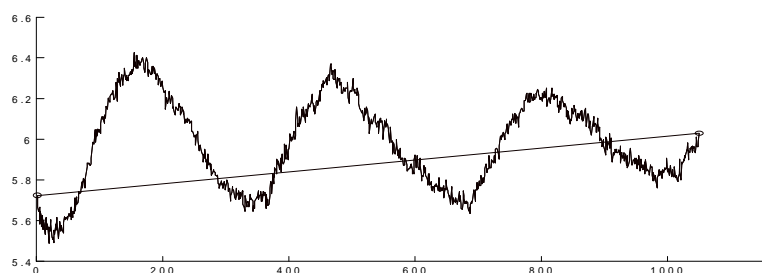


Fig. 7-20 Senyal de control en condicions normals

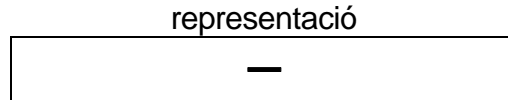
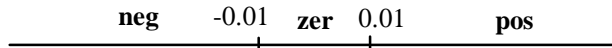


Fig. 7-21 Representació del senyal de la Fig. 7-20.

Intervals característics per a la primera derivada



Intervals característics per a la segona derivada

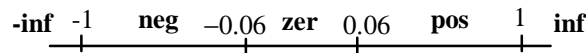
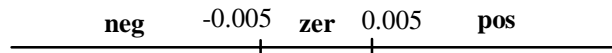


Fig. 7-22 Intervals característics per al senyal de Control.

Intervals característics per a la primera derivada



Intervals característics per a la segona derivada

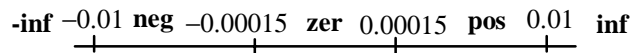


Fig. 7-23 Intervals característics per al senyal del Nivell 2.

En aquest cas la tria dels límits ve determinada pel soroll, no pas per la dinàmica pròpia dels senyals. Cal remarcar que el soroll en els senyals afecta greument la segona derivada, com es pot comprovar en la Fig. 7-24, i que és a partir de la segona derivada que es determinen els episodis que componen la representació. Si no es vol 'representar' el soroll, tampoc no es pot representar completament la dinàmica del senyal. Tot i així és possible obtenir representacions que, tot i ser molt simples, serveixin per l'ús posterior que se'n vol fer, en aquest cas per distingir entre les diferents situacions.

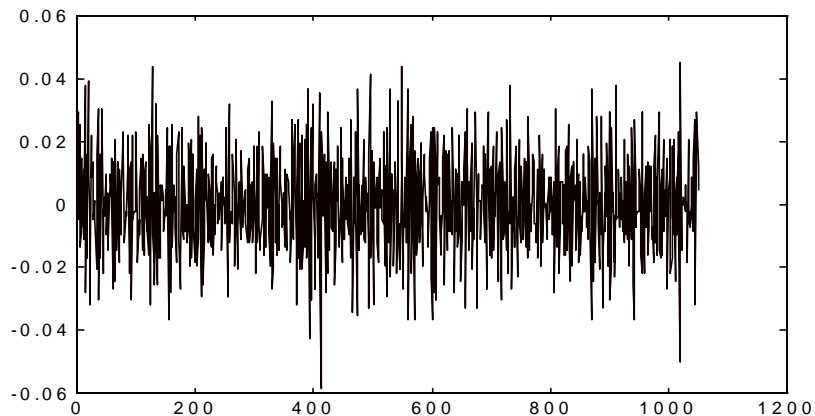


Fig. 7-24 Segona derivada del senyal de la Fig. 7-20.

Amb els límits escollits (Fig. 7-22 i Fig. 7-23) es poden obtenir representacions característiques de les diferents situacions que es volen distingir:

| situació | Control | Nivell 2 |
|----------|-------------|----------|
| 1 | — | — |
| 2 | — | — |
| 3 | —) \ (— | —) / (— |
| 4 (pos.) | —] [—) \ (— | —) / (— |
| 4 (neg.) | —] [—) / (— | —) \ (— |

Taula 7-1 Representacions característiques de cada situació.

No obstant, aquestes representacions característiques poden quedar distorsionades en alguns casos per dues raons:

- Poden aparèixer episodis de curta durada que no representen cap variació significativa del senyal, sinó que són deguts a pics de soroll que provoquen que la segona derivada canviï d'interval característic.
- Les representacions poden quedar excessivament simplificades quan els canvis provocats són relativament petits. Per exemple, la successió —] [—) \ (— que representa el senyal de control en un canvi de consigna positiu es pot transformar en —] [—\ si el canvi de consigna és petit.
- A més, tal i com es pot veure en la Taula 7-1, no és possible distingir entre les situacions 1a (normal) i 2 (tancament de la vàlvula1). Això es produeix a causa del fet que les variacions en els senyals produïdes per el tancament de la vàlvula no es poden detectar amb els límits escollits.

Tots aquests problemes fan aconsellable un filtratge del soroll previ a la representació.

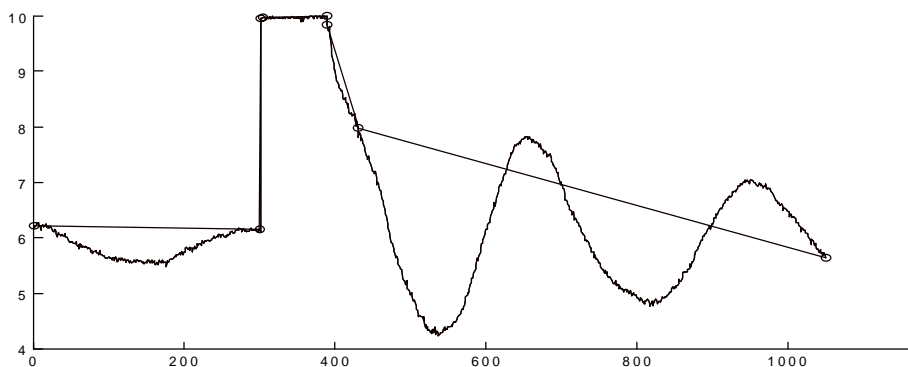


Fig. 7-25 Senyal de Control en un canvi de consigna.

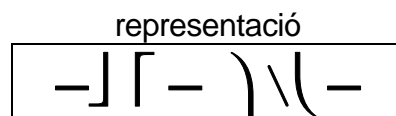


Fig. 7-26 Representació del senyal de la Fig. 7-25.

7.7.2 Detecció amb filtratge del soroll

El primer efecte del filtratge del soroll és que permet una millor tria dels límits, determinada pel comportament dels senyals. Aquest fet provoca l'obtenció de representacions més robustes i més completes dels senyals. Per atenuar el soroll s'ha utilitzat una finestra de 30 punts. Els nous intervals característics són els descrits en les figures Fig. 7-27 i Fig. 7-28 i, com es pot comprovar, són molt diferents als descrits en les figures Fig. 7-22 i Fig. 7-23, on venien determinats pel soroll.

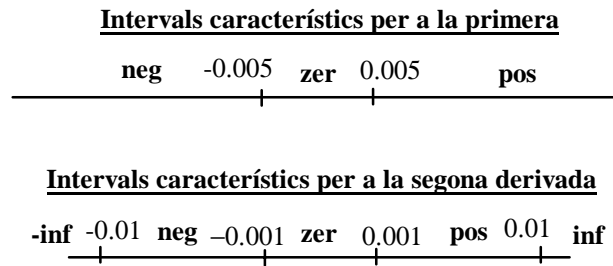


Fig. 7-27 Intervals característics per al senyal de Control.

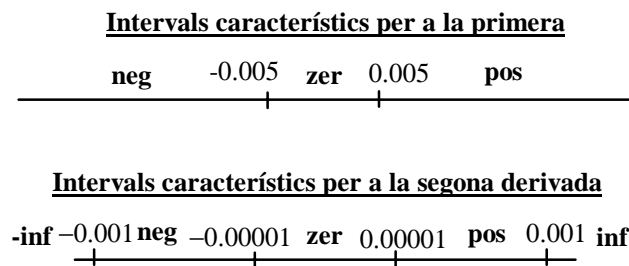


Fig. 7-28 Intervals característics per al Nivell 2.

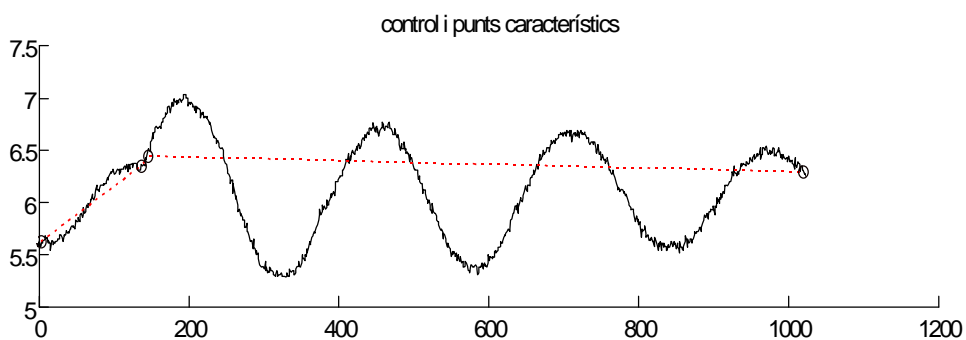


Fig. 7-29 Senyal de Control en un tancament de la Vàlvula 1.

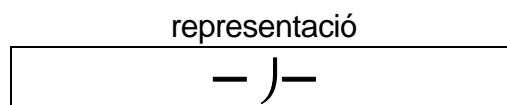


Fig. 7-30 Representació del senyal de la Fig. 7-29.

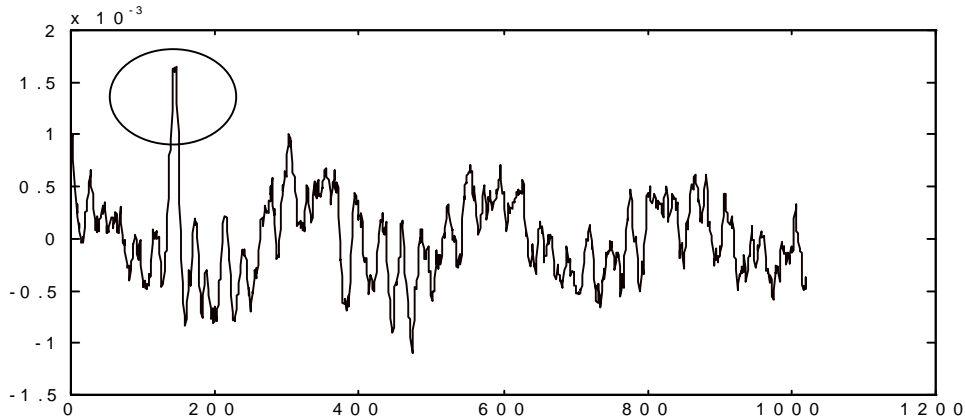


Fig. 7-31 Estimació de la segona derivada del senyal de la Fig. 7-29.

Amb els nous límits escollits es poden obtenir representacions característiques de les diverses situacions que es volen distingir:

| situació | control | nivell 2 |
|----------|---------------|-------------|
| 1 | — | — |
| 2 | — J* — | — |
| 3 | —) \ (— | —) / (... |
| 4 (pos.) | —] / [— ... | —) / (... |
| 4 (neg.) | — [\] — ... | —) / (... |

Taula 7-2 Representacions característiques de cada situació.

Aquestes representacions, a diferència de les obtingudes sense l'eliminació del soroll, permeten distingir tots els casos, i són prou robustes. Com es pot veure en la Fig. 7-24, les variacions en el senyal de control quan es tanca la Vàlvula 1 es poden distingir en l'estimació de la segona derivada i, per tant, apareixen en la representació (*). En els altres casos les representacions són més riques, hi apareixen més episodis, però les seqüències que permeten distingir els diversos casos, que són les que apareixen en la Taula 7-2, són relativament simples.

7.8 Conclusions

En aquest capítol s'han presentat solucions al principal problema que afecta l'anàlisi de senyals reals: la presència de soroll. Després d'analitzar diverses possibilitats, s'ha escollit una tècnica que permet estimar tant la segona derivada com el senyal i la primera derivada. Aquestes tres estimacions no són quantitativament concordants, però sí que ho són qualitativament. A més, els efectes de l'estimació sobre la representació (distorsions en les discontinuïtats i retards) es poden conèixer fàcilment. En conseqüència, les representacions fetes a partir d'aquestes estimacions permeten representar correctament el senyal original.

Com a principal conclusió de l'exemple presentat es pot dir que la presència de soroll en els senyals fa que la tria dels límits dels intervals característics vingui determinada pel soroll i no

per la dinàmica pròpia del senyals. Conseqüentment, les representacions resultants poden ser insuficients des del punt de vista que no contemplen totes les variacions, i els senyals queden subrepresentats. Això pot donar lloc a conclusions falses sobre el comportament del procés. D'altra banda, si s'intenta que les representacions siguin sempre correctes, ajustant més els límits, el soroll fa que apareguin episodis no causats per la dinàmica pròpia del senyal. El resultat final és una sobrerepresentació dels senyals, en el sentit que es representen dinàmiques que no interessin. Per tant, en els casos en què no és possible arribar a un compromís entre la subrepresentació i la sobrerepresentació, és necessari aplicar un filtratge previ del soroll. Aquest filtratge ha de permetre obtenir les representacions desitjades de cada cas.

8. OBTENCIÓ EN LÍNIA DE LA REPRESENTACIÓ EN EPISODIS

8.1 Motivació.

Una immediata aplicació de les representacions en episodis és l'anàlisi de senyals prèviament emmagatzemats. L'estudi de l'evolució dels senyals durant un cert període de temps és útil per fer Diagnosi o Supervisió fora de línia. En aquest sentit, la representació triangular ha estat aplicada en l'Avaluació i Diagnosi de processos *batch* [6] i per a la interpretació de processos biològics [5]. En aquests dos casos la representació en episodis s'efectua fora de línia a partir de dades prèviament emmagatzemades.

Però en molts casos, en Detecció o Diagnosi, és necessari tenir informació dels esdeveniments en el mateix moment en què es produeixen o, en el pitjor dels casos, tan aviat com sigui possible. En el camp de la Supervisió és necessari conèixer l'estat del sistema supervisat a cada instant de temps. Si l'objectiu és únicament monitoritzar el procés, interessa que les dades siguin actualitzades amb la màxima freqüència. És per això que també interessa disposar d'eines que siguin capaces de donar informació en línia sobre l'estat del sistema o sobre el seu comportament.

Per tant, interessa poder aplicar les eines desenvolupades en línia. A més, per facilitar el disseny del Sistema de Supervisió cal que les eines utilitzades en el disseny i en la seva aplicació siguin les mateixes. D'aquesta manera, l'aplicació fora de línia serveix per poder analitzar el sistema supervisat i dissenyar el sistema supervisor, i l'aplicació en línia serveix per supervisar el sistema.

En aquest sentit, el *Llenguatge de Descripció de Tendències* (TDL) [82,83] i l'*Anàlisi Qualitativa de Perfils Temporals* [54] es poden aplicar en línia, utilitzant mètodes diferents.

L'element fonamental de la representació utilitzant TDL són les primitives a partir de les quals es formen els episodis. Les primitives es poden obtenir en línia a cada instant de mostratge, per obtenir-les s'utilitza una Xarxa Neural que englobi tots el passos necessaris. Els problemes associats a aquest mètode ja han estat comentats en el capítol anterior. En la Fig. 8-1 es pot veure l'arquitectura de la xarxa que permet obtenir la primitiva a partir dels valors de senyal en una finestra d'observació de cinc instants de mostratge.

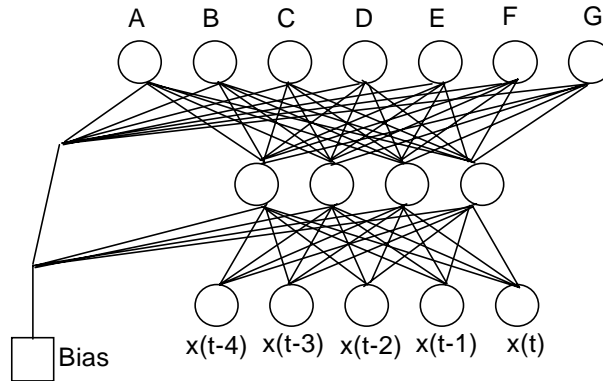


Fig. 8-1 Xarxa Neural utilitzada per obtenir la primitiva en cada instant de mostratge.

D'altra banda, l'Anàlisi Qualitativa de Perfils Temporals no consisteix en una representació de tota l'evolució temporal d'un senyal, sinó que és un reconeixement de formes en intervals de temps prèviament determinats. Aquest reconeixement es pot fer en línia si el final de l'interval de temps és l'instant en què es porta a terme la representació (Fig. 8-2). Aquest mètode reconeix (utilitzant una representació qualitativa) formes concretes en intervals de temps determinats i, per tant, no es pot comparar amb les altres representacions descrites.

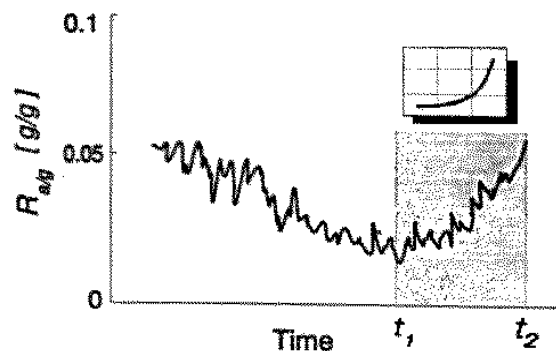


Fig. 8-2 Reconeixement en línia, t_2 és l'instant en què es fa el reconeixement i t_1 és especificat prèviament.

En aquest capítol s'estudia la problemàtica de l'aplicació en línia de la nova representació en episodis descrita en els capítols anteriors. La manera natural d'obtenir la representació en línia és l'actualització de la representació per cada nova dada que s'obté del senyal. En les següents seccions es descriuen els problemes que aquesta metodologia comporta i es proposen les corresponents solucions.

8.2 Obtenció i actualització de la representació.

La representació en episodis descrita en els capítols anteriors es pot dividir en diversos passos:

- Obtenció de la funció característica (segona derivada del senyal)
- Qualificació de la funció característica
- Determinació d'instantos característics (canvis en el valor qualitatiu de la funció característica)
- Determinació del tipus (classificació) i de les característiques numèriques dels episodis.

Els tres primers passos no representen cap problema respecte a la seva aplicació en línia. Com ja s'ha comentat, l'obtenció de la segona derivada es pot fer de diferents maneres, en funció del nivell de soroll del senyal, mitjançant diferències finites si el senyal no té soroll o utilitzant algun mètode de tractament del senyal per eliminar el soroll. Cal tenir en compte que qualsevol tractament del senyal ha de ser realitzable en línia i també que produirà retards en els resultats obtinguts.

La determinació del tipus i de les característiques numèriques dels episodis, però, depèn de la detecció dels instantos característics. Tots els episodis han d'estar limitats per dos instantos característics, i algunes dades del senyal en aquests instantos són necessàries per a la classificació de l'episodi. En les representacions obtingudes fora de línia, l'últim instant de mostratge es considera com a instant característic, obtenint, d'aquesta manera, una representació completa en què l'instant característic de la dreta de l'últim episodi és l'últim instant de mostratge.

Per obtenir la representació en línia es pot seguir el mateix mètode per a cada nova dada que s'obté del senyal. L'últim episodi de la representació, doncs, estarà limitat, per l'esquerra, per l'últim instant característic detectat i per la dreta per l'últim instant de mostratge. D'aquesta manera, els episodis entre els instantos característics detectats s'aniran mantenint al llarg del temps, però no passarà el mateix per a l'últim episodi de la representació, que anirà canviant a cada nou instant de mostratge. La representació, per tant, tindrà una part fixa i una altra part (l'últim episodi) que podrà canviar fins que l'últim instant no sigui un instant característic detectat com a tal. Quan això passi, l'últim episodi passarà a formar part de la representació fixa i començarà un nou episodi 'variable'.

8.3 Problemes propis de la representació en línia.

En la secció anterior s'ha explicat la manera d'obtenir la representació en línia. Aquest mètode, però, pot comportar problemes, ja que l'últim episodi de la representació, excepte en alguns casos, no és mai el definitiu, el que sortiria fent la representació fora de línia. Per exemple en les figures Fig. 8-3, Fig. 8-4 i Fig. 8-5 es pot veure com la representació en línia d'un senyal pot variar al llarg del temps. En aquest cas, la representació obtinguda a l'instant t_1 no és la completa, que només es pot obtenir, qualitativament i quantitativament a partir de l'instant t_2 .

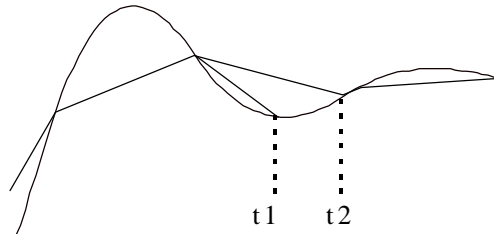


Fig. 8-3 Senyal i punts característics fins a dos instants de temps diferents.

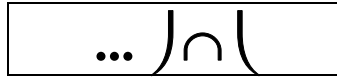


Fig. 8-4 Representació del senyal de la Fig. 8-3 obtinguda en l'instant t1.



Fig. 8-5 Representació del senyal de la Fig. 8-3 obtinguda en l'instant t2.

Aquests problemes poden comportar errors en el posterior ús de la representació, i donar lloc a conclusions que no s'ajustin a la realitat, ja que s'hauran obtingut a partir d'una representació incompleta. La solució proposada per tenir en compte aquest fet, detallada en la secció següent, és la utilització de raonament difús per classificar l'últim episodi de la representació i per detectar els instants característics. D'aquesta manera és possible obtenir, en comptes del tipus d'episodi a cada instant de mostratge, els graus de certesa per a cadascun dels 13 possibles tipus. Això millora la qualitat de la informació obtinguda i, per tant, ha de servir per facilitar el posterior ús d'aquesta informació, ja sigui per predir com evolucionarà l'episodi actual o directament en la Detecció o Diagnosi.

8.4 Detecció d'instantos característics i classificació en línia dels episodis.

La classificació dels episodis presentada en el capítol anterior es basa en tres característiques: el valor qualitatiu de la segona derivada, constant en tot l'episodi i els dos valors qualitiatius de la derivada en els dos instants característics que delimiten l'episodi. Per aquest motiu la classificació en línia s'ha estructurat en diferents parts, que són les que es poden veure en la Fig. 8-6.

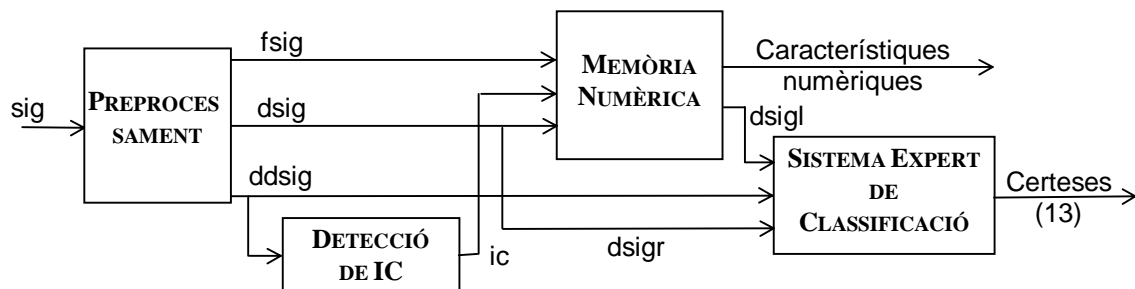


Fig. 8-6 Parts en què es pot estructurar la classificació en línia.

En primer lloc, el preprocessament del senyal (*sig*) serveix per obtenir els valors numèrics del senyal filtrat (*f_{sig}*), de la derivada (*dsig*) i de la segona derivada (*ddsig*). A continuació, a partir de la segona derivada, es detecten els punts característics (*ic*). En la part anomenada 'memòria numèrica' s'emmagatzemen les dades numèriques dels punts característics i s'obtenen les característiques numèriques dels episodis. Finalment, el Sistema Expert de Classificació serveix per obtenir la certesa per a cada tipus d'episodi a partir de la derivada en els extrems de l'episodi (*dsigl* i *dsigr*) i la segona derivada (*ddsig*). L'explicació detallada de les tasques de cada una d'aquestes parts es detalla en les següents seccions.

8.4.1 La qualificació i el raonament (classificació) en CEES.

L'eina de raonament difús proposada per detectar els instants característics i classificar els episodis és l'entorn de desenvolupament de sistemes experts CEES (*C++ Embedded Expert System*) [24,65]. CEES és un sistema d'inferència d'encadenament endavant, amb una sintaxi específica, que utilitza una metodologia orientada a objectes i que permet cooperació entre sistemes experts. En aquesta secció només es descriuran aquelles característiques utilitzades per obtenir la representació en episodis, especificant de quina manera s'han utilitzat.

CEES assigna a cada variable o dada numèrica tres funcions de pertinença que permeten comparar-la amb altres dades numèriques. Aquestes tres funcions de pertinença s'associen a les comparacions més immediates que es poden fer: *igual a*, *més gran que* o *més petit que*. La comparació amb un altre valor numèric dóna com a resultat el valor de la funció de pertinença corresponent a la comparació feta per aquest altre valor.

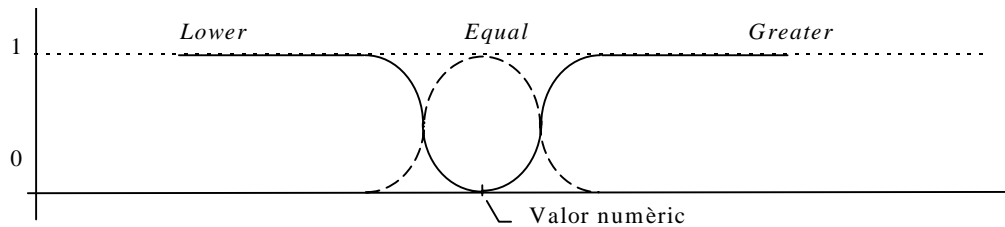


Fig. 8-7 Funcions de pertinença, associades a comparacions, per a cada dada numèrica.

A més, CEES permet assignar cinc valors representatius a cada variable (*lowest*, *low*, *normal*, *high* i *highest*), aquests cinc valors estan pensats per caracteritzar el rang de valors que pot prendre una variable, i es poden utilitzar com a dades numèriques per establir comparacions de la manera que s'ha descrit anteriorment. Aquestes característiques de CEES són les que s'han utilitzat per representar les variables que cal qualificar: la segona derivada i la derivada en els extrems de l'episodi. Per això s'han identificat els límits que separen els intervals característics (Fig. 8-8) amb els valors representatius de CEES, com es pot veure en la Taula 8-1. D'aquesta manera, per obtenir la pertinença del valor d'una funció característica a un interval característic, només cal comparar el seu valor amb els límits de l'interval. En les figures Fig. 8-11 i Fig. 8-14 es poden veure algunes de les regles utilitzades en aquest sentit.

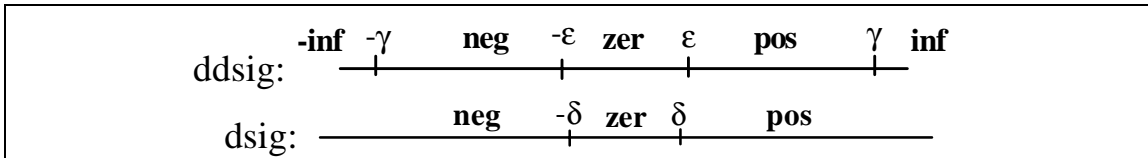


Fig. 8-8 Límits dels intervals característics per a la primera i segona derivades.

| | ddsig | dsig |
|---------|------------|----------|
| lowest | γ | - |
| low | ϵ | δ |
| normal | 0 | 0 |
| high | ϵ | δ |
| highest | γ | - |

Taula 8-1 Correspondència entre els límits dels intervals característics i els valors significatius de CEES.

8.4.2 Preprocessament del senyal.

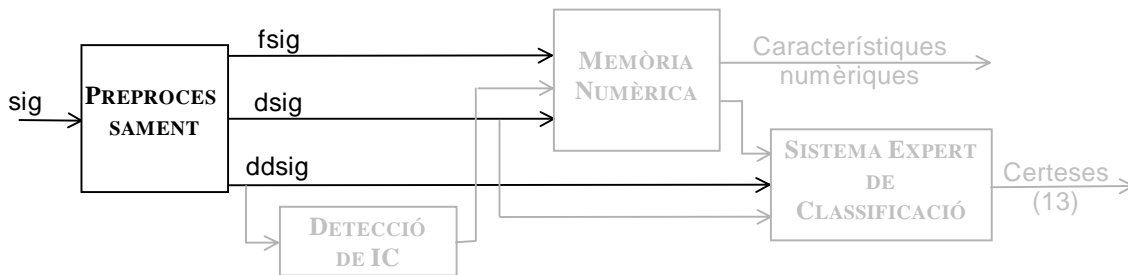


Fig. 8-9 Preprocessament del senyal original.

En aquesta primera etapa es filtra el senyal, si cal, i s'obtenen la primera i segona derivades. El filtrat del senyal i l'obtenció de les derivades es fan seguint la tècnica proposada en el capítol anterior. Utilitzant la idea de les finestres lliscants es fa una estimació d'aquestes tres dades, necessàries en les altres etapes, en cada instant de mostratge.

8.4.3 Detecció d'instant característics.

El segon pas per poder obtenir la representació ha de ser la detecció dels instants característics. Aquesta detecció es fa únicament a partir de la segona derivada, o més concretament del valor qualitatiu de la segona derivada. Com a resultat s'obté un senyal binari que indica, a cada instant de mostratge, si és o no un instant característic. Per dur a terme la detecció s'utilitzen únicament les cinc regles que es poden veure a la Fig. 8-11., que serveixen per detectar quan hi ha un canvi en el valor qualitatiu de la segona derivada.

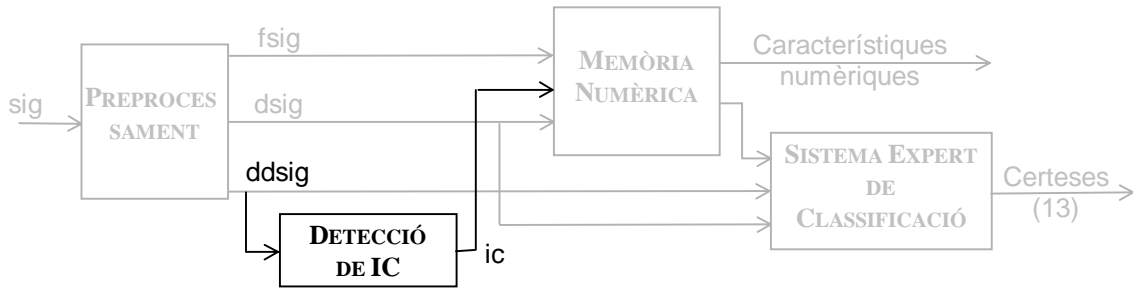


Fig. 8-10 Detecció d'instants característics.

```

Rule 10
    Certainty 1. Threshold 0.1
    Description "infit"
    If ddsig.fv.greater (ddsig.fv.highest)
        And ddsigant.fv.greater (ddsigant.fv.highest)
    Then deduce( &nocanvi,INTERMEDIATE)
    EndIf
EndRule
Rule 20
    Certainty 1. Threshold 0.1
    Description "positiu"
    If ddsig.fv.lower(ddsig.fv.highest)
        And ddsig.fv.greater (ddsig.fv.high)
        And ddsigant.fv.lower(ddsigant.fv.highest)
        And ddsigant.fv.greater (ddsigant.fv.high)
    Then deduce( &nocanvi,INTERMEDIATE)
    EndIf
EndRule
Rule 30
    Certainty 1. Threshold 0.1
    Description "zero"
    If ddsig.fv.lower(ddsig.fv.high)
        And ddsig.fv.greater (ddsig.fv.low)
        And ddsigant.fv.lower(ddsigant.fv.high)
        And ddsigant.fv.greater (ddsigant.fv.low)
    Then deduce( &nocanvi,INTERMEDIATE)
    EndIf
EndRule
Rule 40
    Certainty 1. Threshold 0.1
    Description "negatiu"
    If ddsig.fv.lower(ddsig.fv.low)
        And ddsig.fv.greater (ddsig.fv.lowest)
        And ddsigant.fv.lower(ddsigant.fv.low)
        And ddsigant.fv.greater (ddsigant.fv.lowest)
    Then deduce( &nocanvi,INTERMEDIATE)
    EndIf
EndRule
Rule 50
    Certainty 1. Threshold 0.1
    Description "-infit"
    If ddsig.fv.lower(ddsig.fv.lowest)
        And ddsigant.fv.lower(ddsigant.fv.lowest)
    Then deduce( &nocanvi,INTERMEDIATE)
    EndIf
EndRule
    
```

Fig. 8-11 Regles per a la detecció d'instants característics.

Aquestes cinc regles serveixen per comparar els valors qualitius de la segona derivada en l'instant actual (ddsig) amb l'anterior (ddsigant) i donen com a resultat el grau de semblança entre aquests dos valors. Els instants característics es detecten quan aquest grau de semblança (nocanvi) baixa per sota d'un llindar.

8.4.4 Memòria numèrica.

El bloc anomenat **Memòria Numèrica** s'encarrega d'emmagatzemar els instants característics i els valors del senyal i la primera derivada en aquests instants. Aquestes dades s'actualitzen cada cop que es detecta un instant característic. Aquest bloc també es pot encarregar, si cal, de calcular les característiques numèriques de l'episodi. El valor de la derivada en l'últim instant característic detectat, necessari per a la classificació de l'episodi, és la sortida d'aquest bloc que se subministra al **Sistema Expert de Classificació**.

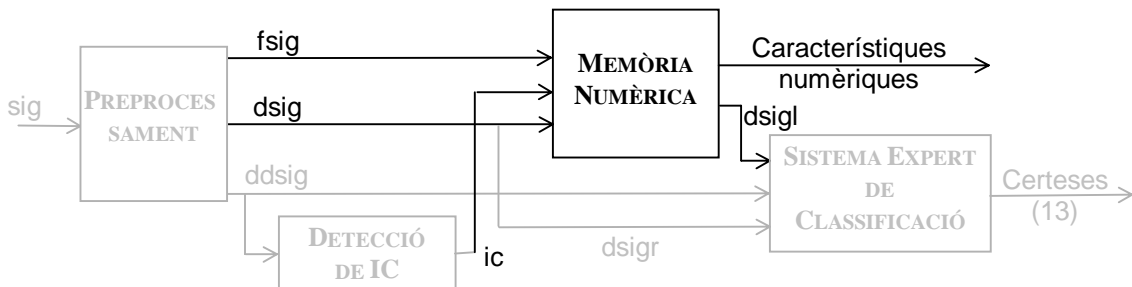


Fig. 8-12 Memòria numèrica.

8.4.5 Classificació.

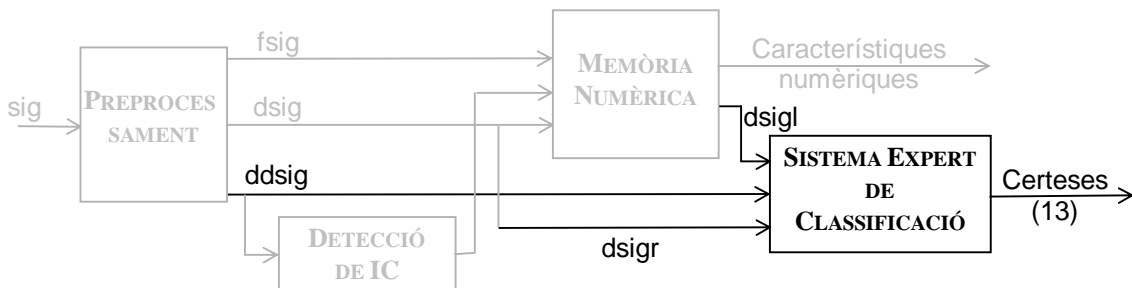


Fig. 8-13 Sistema Expert de classificació.

La Classificació dels episodis es basa en els valors qualitius de la segona derivada i de la primera derivada en els extrems de l'episodi. En la classificació en línia, els extrems de l'episodi són, per l'esquerra, l'últim instant característic detectat, i, per la dreta, l'instant actual. Aquestes tres dades són les entrades d'aquest bloc, un Sistema Expert del qual en la Fig. 8-14 es poden veure algunes regles. A la sortida d'aquest bloc s'obtenen 13 valors entre 0 i 1 que representen la certesa per a cadascun dels 13 tipus d'episodis. A la Taula 8-2 es poden veure la identificació i la sortida corresponent per cadascun dels tipus, i a la Fig. 8-14 les regles corresponents a la classificació dels tipus)
(e), \ (f) i – (g).

El conjunt de regles del Sistema Expert de Classificació es correspon amb la **classificació útil** dels episodis descrita en la secció 5.7 i representada de la Taula 5-1 a la Taula 5-5. Un resum de totes les regles es pot veure a la Taula 8-3, on cada fila correspon a una regla i cada regla serveix per obtenir la certesa per a un tipus d'episodi.

| | ddsig | dsigl | dsigr |
|-----|--|--|--|
| a] | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- |
| b [| lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- |
| c (| lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- |
| d) | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- |
| e \ | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- |
| f / | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- |
| g - | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- |
| h . | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- |
| i ^ | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- |
| j v | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- |
| k > | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- |
| l < | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- |
| m | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- | lowest low normal high highest ----- ----- ----- ----- ----- |

Taula 8-3 Resum de regles del sistema expert de classificació; les tres regles de la Fig. 8-14 apareixen emmarcades.

Cal remarcar que aquest conjunt de regles és general, serveix per obtenir la representació de qualsevol senyal. Les característiques pròpies de cada senyal s'expressen en forma dels intervals característics de la primera i segona derivades, tal com s'ha explicat en la secció 8.4.1.

La correspondència de les regles de la representació en línia amb les taules utilitzades en la representació fora de línia fa que les representacions obtingudes en ambdós casos siguin equivalents. Per mostrar aquest fet s'han repetit, en línia, alguns dels exemples fora de línia presentats en les seccions 6.2 i 6.3.

8.5 Exemples de representació en línia.

En els exemples que es presenten a continuació es mostra el funcionament de la representació en línia. Els exemples escollits coincideixen amb alguns dels utilitzats en el Capítol 6 per mostrar la representació fora de línia, per poder comparar els resultats obtinguts en cada cas.

El resultat, en els casos presentats, és l'evolució de la certesa per a cada tipus d'episodi i els instants característics detectats. La interpretació dels resultats obtinguts s'ha de fer tenint en compte les següents consideracions:

- La representació va variant al llarg del temps, actualitzant-se a cada instant de mostrejat.
- La part variable de la representació és sempre l'últim episodi, entre l'últim instant característic detectat i l'instant actual.
- La resta de la representació, formada pels episodis fins a l'últim instant característic detectat, és fixa.
- A mesura que es detecten nous instants característics, s'incorporen nous episodis a la part fixa de la representació.
- El tipus de l'episodi que s'incorpora a la part fixa és el de màxima certesa en l'instant característic detectat (que anomenarem **tipus dominant**).

8.5.1 Sistemes lineals.

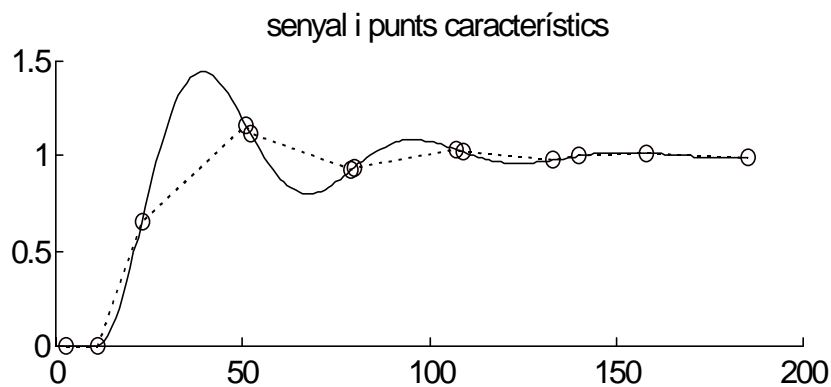


Fig. 8-15 Senyal i instants característics en la representació fora de línia de la resposta a un graó d'un sistema de segon ordre.

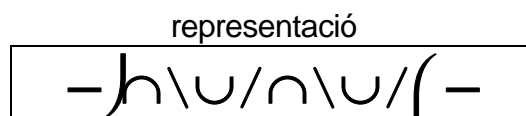


Fig. 8-16 : Representació fora de línia del senyal de la Fig. 8-15.

En l'exemple que es presenta en aquesta secció es mostren en detall els resultats d'obtenir la representació en línia de la resposta a un graó d'un sistema lineal de segon ordre. Els resultats obtinguts són semblants als obtinguts fora de línia, tot i que no són exactament iguals a causa, sobretot, dels mètodes utilitzats per calcular les derivades del senyal i per detectar els instants característics i els retards produïts en els diversos passos de la representació.

El senyal estudiat (Fig. 8-15) és la resposta d'un sistema de segon ordre subesmorteït. La representació fora de línia (Fig. 8-16) d'aquest senyal ja ha estat comentada en la secció 6.2; els episodis que caracteritzen aquest senyal són els de tipus \cup , \cap (que representen oscil·lacions) i $-$ (estabilitat).

La representació en línia que es presenta a continuació s'ha obtingut utilitzant els mateixos límits dels intervals característics triats per a la representació fora de línia. El primer que es pot estudiar són els instants característics detectats; en la Fig. 8-17 es pot veure que n'apareixen menys que en la representació fora de línia, però els que apareixen ho fan en instants semblants i, com es veurà a continuació, el resultat final no varia molt a causa d'aquest fet.

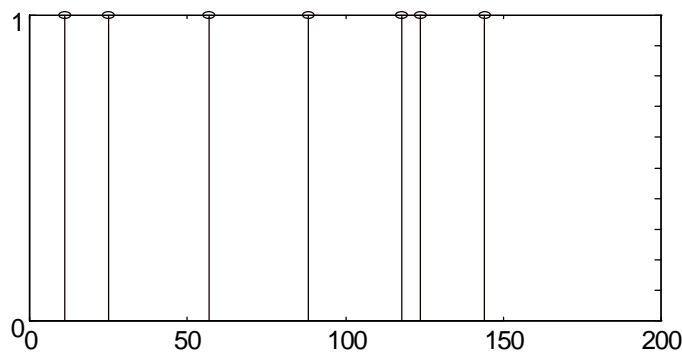


Fig. 8-17 Instants característics detectats en els instants 11, 25, 57, 88, 118, 124 i 144.

Com es pot deduir a partir de les figures Fig. 8-17 i Fig. 8-18, els episodis que no es detecten són els d'inflexió (\setminus i $/$), que únicament representen transicions. També es pot observar que l'episodi d'estabilitat ($-$) comença abans; això es degut a que s'han utilitzat els mateixos límits, però el mètode utilitzat per calcular les derivades és diferent.

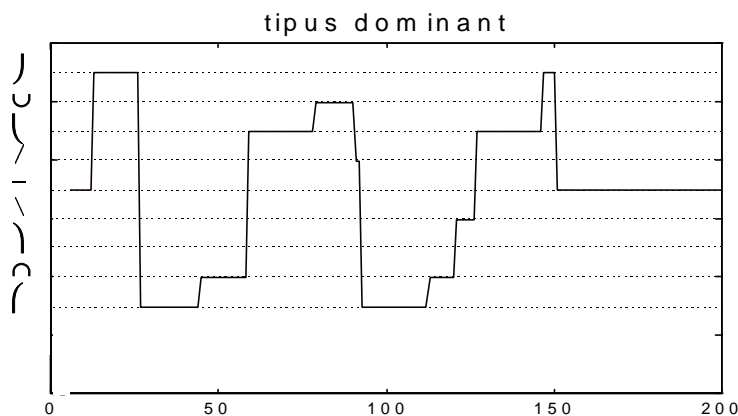


Fig. 8-18 Evolució del tipus amb màxima certesa (tipus dominant).

En qualsevol cas, la representació resultant no pot considerar-se significativament diferent a l'obtinguda fora de línia. En les següents figures es presenten detalladament les evolucions de les certes per a cadascun dels 13 tipus d'episodis. Per obtenir la representació, només es té en compte quin és el tipus amb la màxima certesa, però la informació aportada per aquestes tretze certes enriqueix el coneixement sobre el senyal.

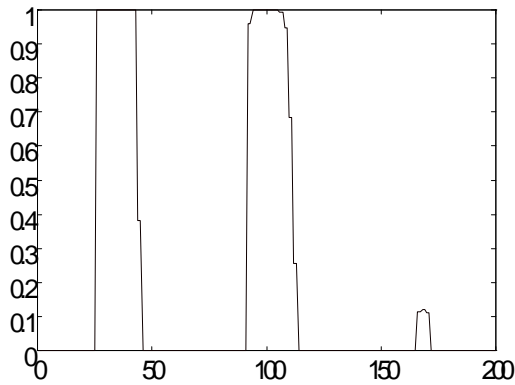


Fig. 8-19 Evolució de la certesa per al tipus (.).

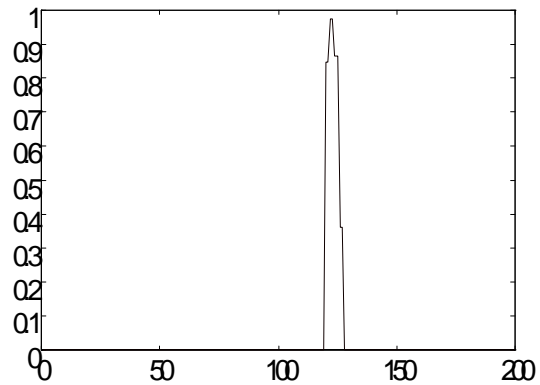


Fig. 8-22 Evolució de la certesa per al tipus (\.).

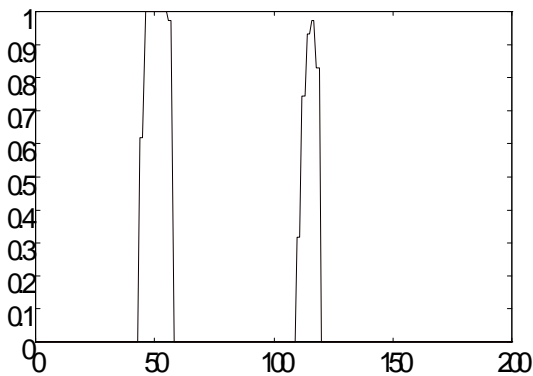


Fig. 8-20 Evolució de la certesa per al tipus (o).

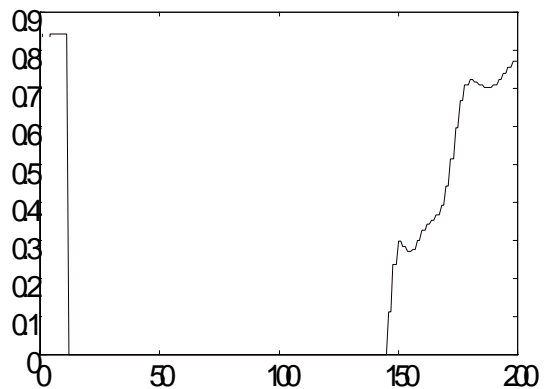


Fig. 8-23 Evolució de la certesa per al tipus (-).

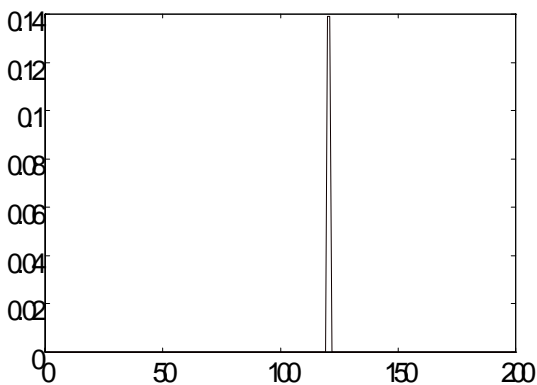


Fig. 8-21 Evolució de la certesa per al tipus (}).

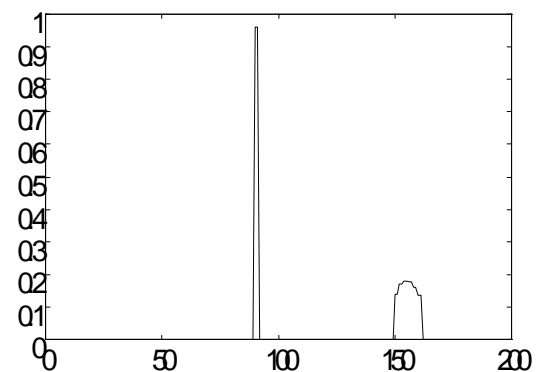


Fig. 8-24 Evolució de la certesa per al tipus (/).

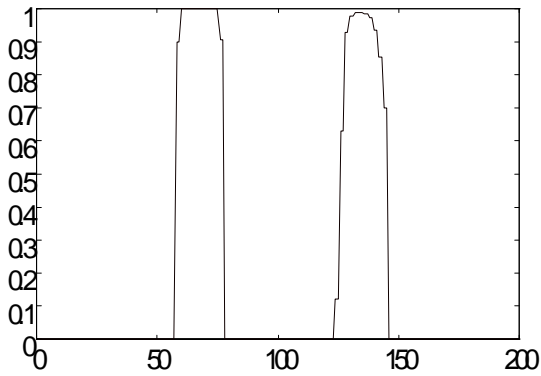


Fig. 8-25 Evolució de la certesa per al tipus (.).

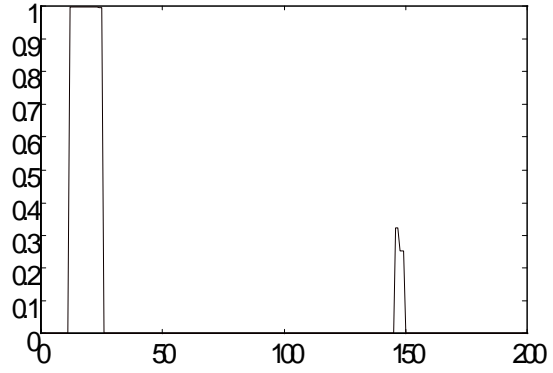


Fig. 8-27 Evolució de la certesa per al tipus (/).

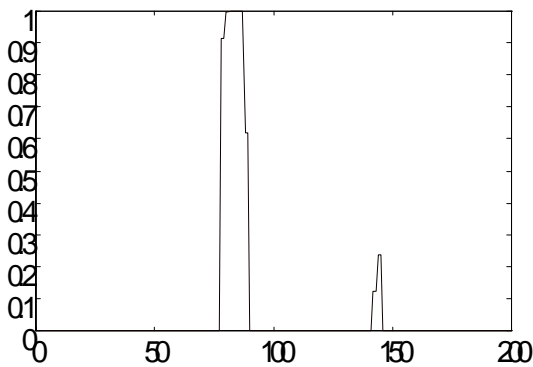


Fig. 8-26 Evolució de la certesa per al tipus (∪).

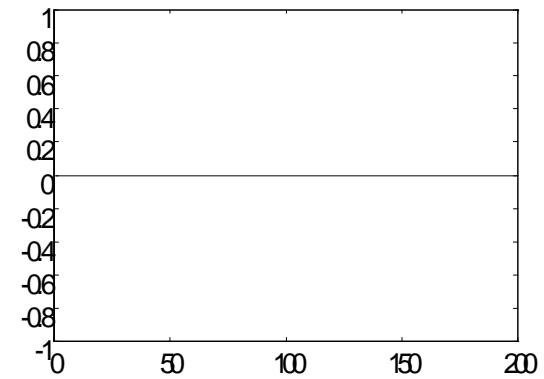


Fig. 8-28 Evolució de la certesa per als tipus (] [] i [).

8.5.2 Sistemes no lineals.

El sistema no lineal estudiat és el sistema conegut com a depredador-presa, que ja s'ha explicat en la secció 6.3. El model i les simulacions dels quals s'ha obtingut la representació en línia són els mateixos que els utilitzats en la representació fora de línia; en la Fig. 8-29 es pot veure el model en SIMULINK utilitzat en aquest cas. Igualment que amb els sistemes lineals, els resultats obtinguts en els dos casos són semblants, tot i que es poden observar petites diferències.

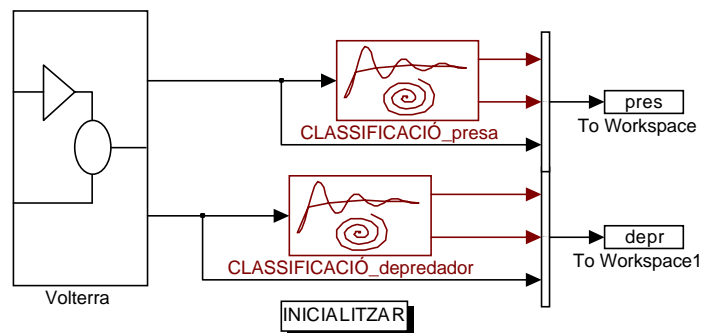


Fig. 8-29 Esquema SIMULINK per obtenir la representació en línia dels senyals del sistema depredador-presa.

En les figures Fig. 8-30 a Fig. 8-37 es poden veure les evolucions del tipus d'episodi amb certesa màxima en diferents casos. El principal comentari que es pot fer a partir d'aquestes figures és que en alguns instants es produeixen indeterminacions. En aquests instants no es dedueix cap tipus d'episodi. Aquest fet, que no s'havia observat en les representacions de sistemes lineals, només afecta l'últim episodi de la representació (part variable) i succeeix immediatament després de la detecció d'alguns instants característics.

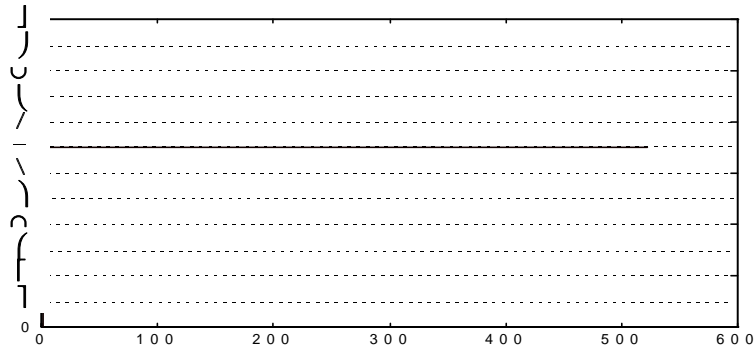


Fig. 8-30 Evolució de l'episodi amb certesa màxima per a N1 en el cas 1.

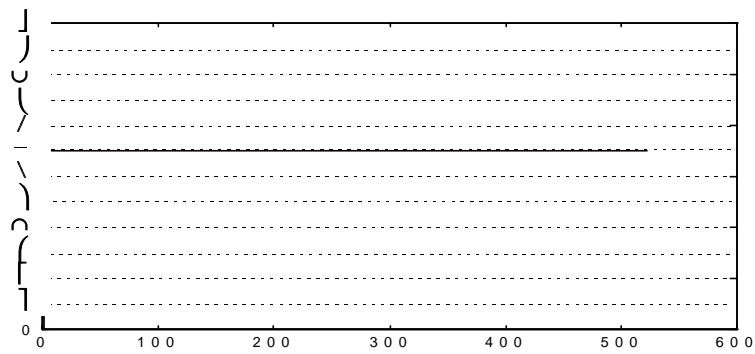


Fig. 8-31 Evolució de l'episodi amb certesa màxima per a N2 en el cas 1.

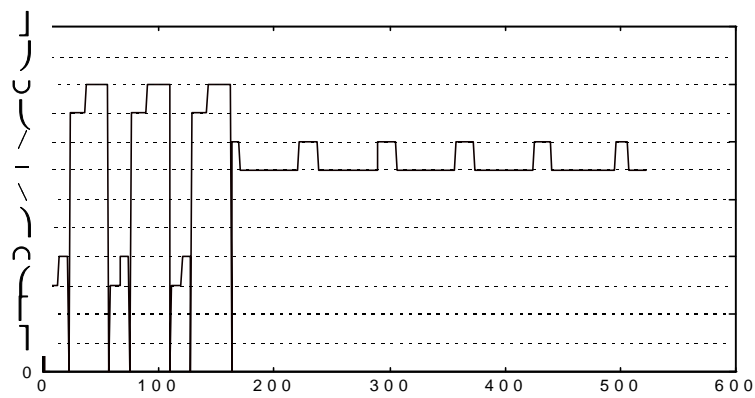


Fig. 8-32 Evolució de l'episodi amb certesa màxima per a N1 en el cas 5.

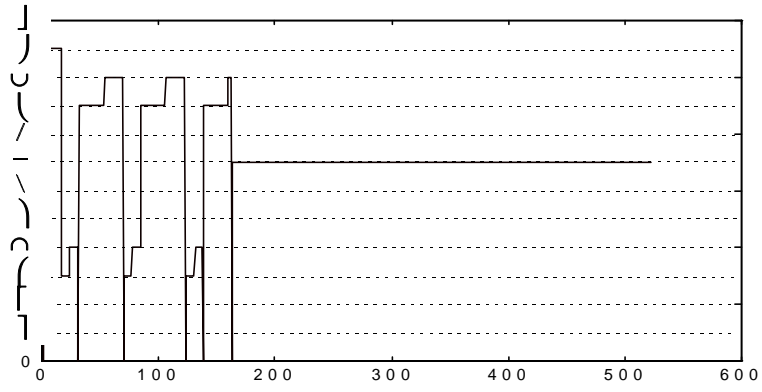


Fig. 8-33 Evolució de l'episodi amb certesa màxima per a N2 en el cas 5.

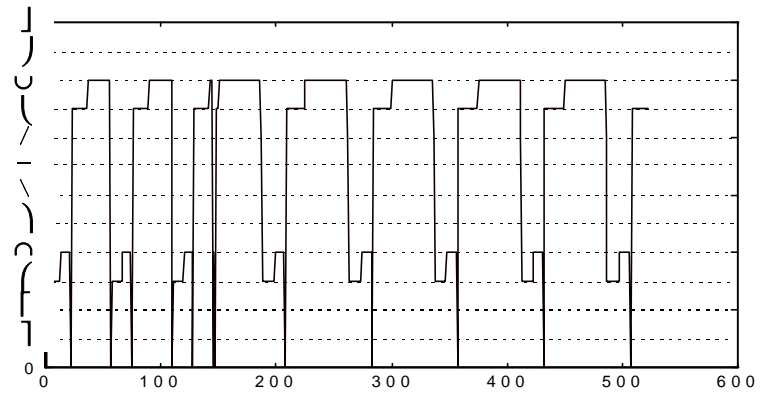


Fig. 8-34 Evolució de l'episodi amb certesa màxima per a N1 en el cas 6.

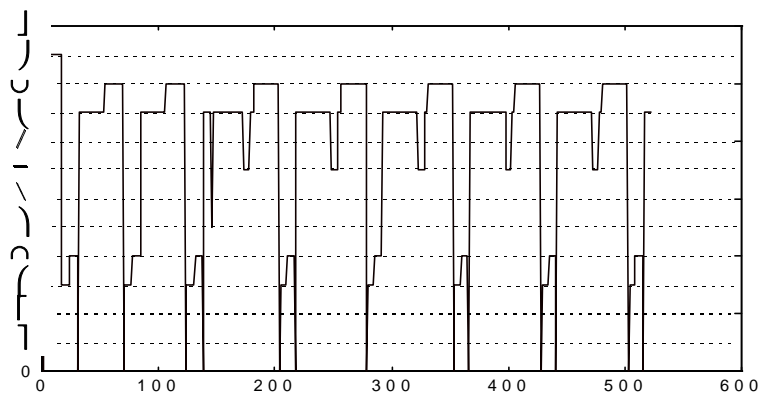


Fig. 8-35 Evolució de l'episodi amb certesa màxima per a N2 en el cas 6.

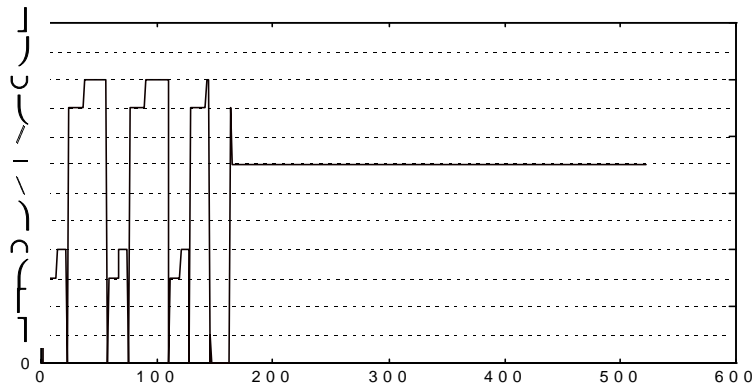


Fig. 8-36 Evolució de l'episodi amb certesa màxima per a N1 en el cas 10.

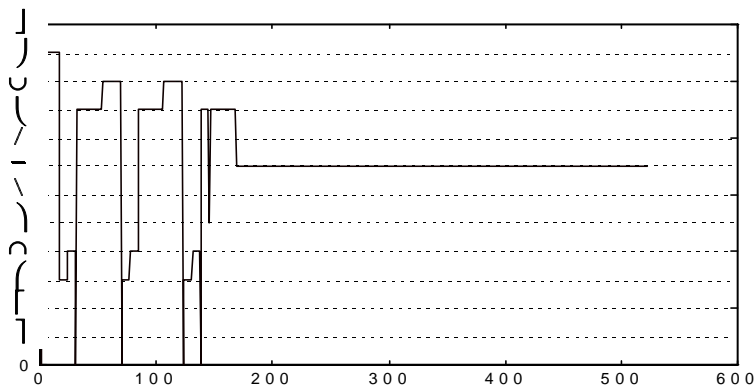


Fig. 8-37 Evolució de l'episodi amb certesa màxima per a N2 en el cas 10.

8.5.2.1 Estudi detallat d'un dels senyals.

Aquí es presenten detalladament tots els resultats de representar en línia un dels senyals corresponents al sistema depredador-presa. El senyal representat correspon a un dels casos presentats en la secció 6.3 i es pot veure en la Fig. 8-38. Les dinàmiques presents en aquest senyal són força variades: oscil·lacions, una discontinuïtat, decreixement i estabilitat.

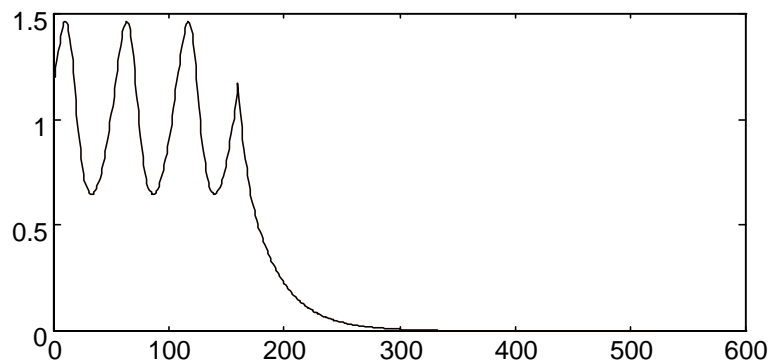


Fig. 8-38 Població de preses (N1) en el cas 13 (amb pesca excessiva a partir de la setmana 160).

Igualment que en la representació fora de línia, els episodis que passen a formar part de la representació fixa reflecteixen perfectament el comportament del senyal. En aquest cas es pot veure com, durant un període de temps, el tipus amb certesa màxima és \setminus ; aquest tipus, però, no passa a formar part de la representació fixa, ja que en aquest període de temps no es detecta cap instant característic.

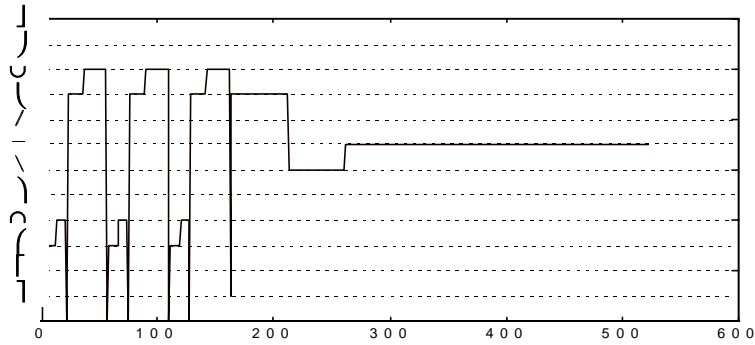


Fig. 8-39 Evolució de l'episodi amb certesa màxima per al senyal de la Fig. 8-38.

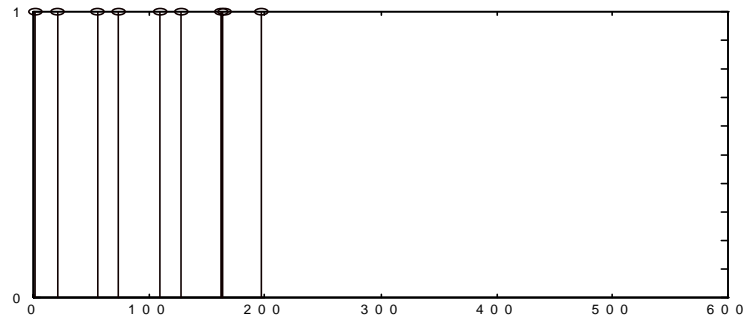


Fig. 8-40 Punts característics per al senyal de la Fig. 8-38.

A continuació es presenten les evolucions de les certes per cadascun dels diferents tipus d'episodis. Es pot veure que quan el senyal oscil·la els canvis en la certesa són bruscs, es passa de 0 a 1 molt ràpidament; això és degut que les variacions en el senyal són ràpides; en canvi, quan el senyal s'apropa a l'estabilització, els canvis en la certesa són més suaus.

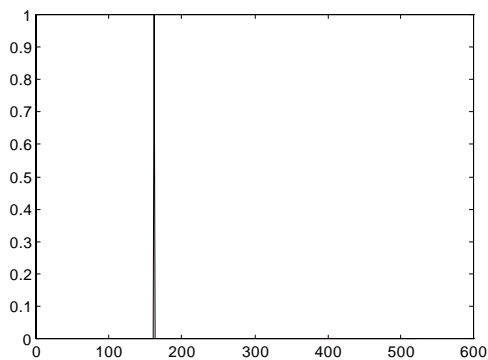


Fig. 8-41 Evolució de la certesa del tipus \setminus per al senyal de la Fig. 8-38.

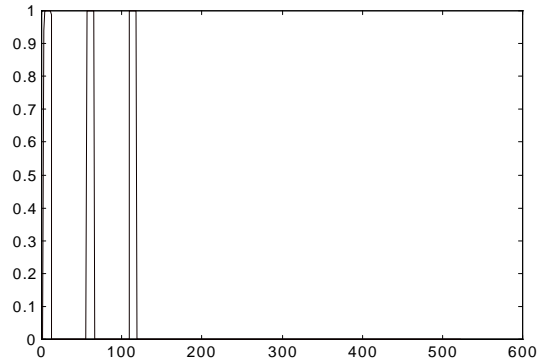


Fig. 8-42 Evolució de la certesa del tipus $($ per al senyal de la Fig. 8-38.

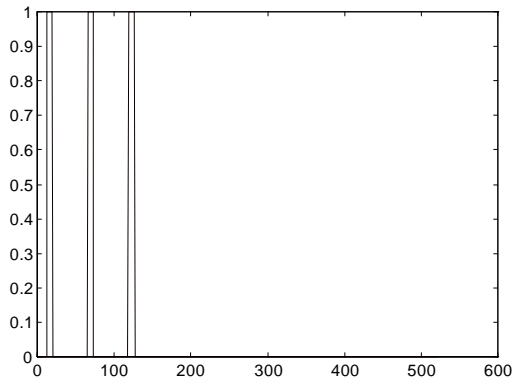


Fig. 8-43 Evolució de la certesa del tipus \cap per al senyal de la Fig. 8-38.

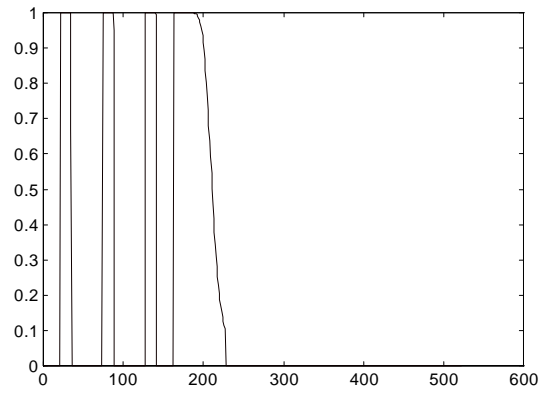


Fig. 8-46 Evolució de la certesa del tipus \cup per al senyal de la Fig. 8-38.

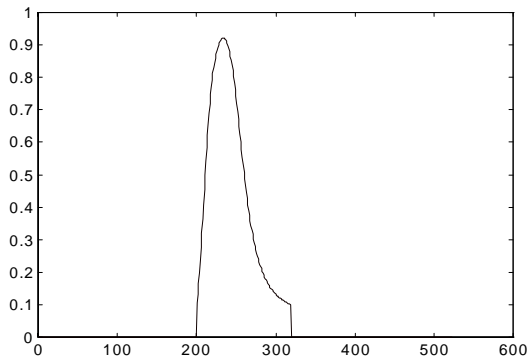


Fig. 8-44 Evolució de la certesa del tipus \setminus per al senyal de la Fig. 8-38.

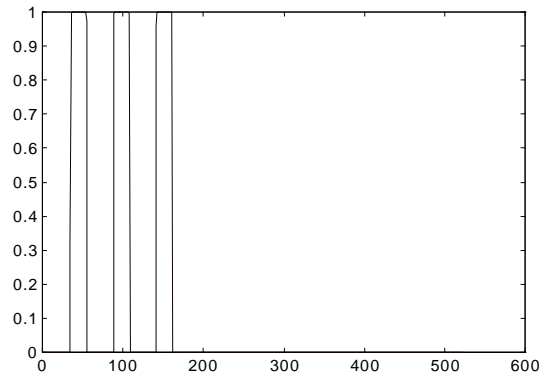


Fig. 8-47 Evolució de la certesa del tipus \cap per al senyal de la Fig. 8-38.

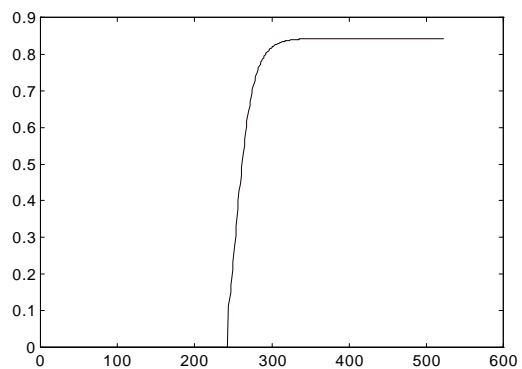


Fig. 8-45 Evolució de la certesa del tipus $-$ per al senyal de la Fig. 8-38.

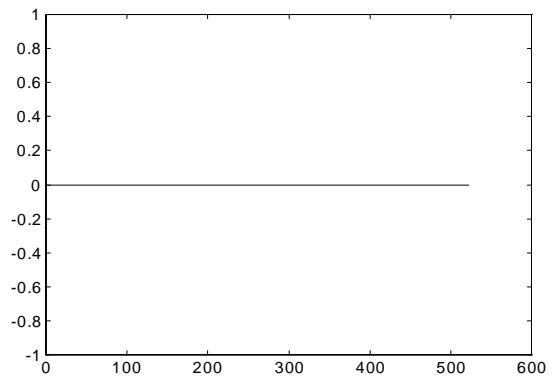


Fig. 8-48 Evolució de la certesa dels tipus \cap i \cup per al senyal de la Fig. 8-38.

8.6 Conclusions.

L'obtenció de la representació dels senyals en episodis en línia és necessària, ja que en la Detecció o Diagnosi de fallades i, en general, en totes les tasques de Supervisió cal, en molts casos, conèixer l'estat del procés a cada instant de temps.

En aquest capítol s'ha presentat un mètode per obtenir en línia la representació en episodis descrita en els capítols anteriors. Les principals característiques del mètode presentat son:

- La representació s'actualitza a cada instant de mostreig, de manera que es pot descompondre en una part fixa (fins a l'últim instant característic detectat) i una part variable (des de l'últim instant característic detectat fins a l'instant actual) que es va actualitzant.
- La detecció dels instants característics i la deducció del tipus d'episodi a cada instant es fan mitjançant petits Sistemes Experts, les regles dels quals són completament generals. Els únics paràmetres que cal ajustar són els mateixos que en la representació fora de línia: els límits dels intervals característics.
- Amb els mateixos valors dels paràmetres, els resultats obtinguts fora de línia i en línia no presenten diferències significatives. Això permet utilitzar la representació fora de línia per analitzar el procés i per dissenyar el sistema de Supervisió i la representació en línia, si cal, per dur a terme la Supervisió.
- El mètode utilitzat permet obtenir no solament el tipus d'episodi a cada instant, sinó també la certesa per a tots els tipus possibles. Això enriqueix la informació que es té del senyal, i permet deduir la proximitat de canvis o de quin tipus pot ser l'episodi variable quan passi a formar part de la part fixa de la representació.
- Com a principal problema cal remarcar que en alguns instants el tipus de l'últim episodi de la representació queda indeterminat. Aquest fet, però, només afecta la part variable de la representació i, per tant, en els instants posteriors aquesta deficiència ja queda resolta.

9. CONCLUSIONS I TREBALL

FUTUR

La Supervisió de Processos és la disciplina en la qual s'agrupen les diverses tasques o fases encarregades de mantenir el bon funcionament dels processos. La diversitat de mètodes i tècniques per dur a terme aquestes tasques fa que sigui difícil, en molts casos, separar-les i classificar-les. La diferent naturalesa de les dades tractades i dels coneixements que es poden utilitzar fa que els mètodes basats en coneixement siguin necessaris en la Supervisió de processos. La necessitat d'incorporar coneixement expert i, per tant, eines de la IA és present en totes les fases de la Supervisió.

Una tasca important i necessària en Supervisió és el tractament dels senyals que provenen del procés per tal de facilitar el desenvolupament d'altres eines que manipulin o raonin sobre aquests senyals. La IA manipula símbols; per tant, necessita eines que s'encarreguin del tractament dels senyals numèrics per obtenir-ne informacions simbòliques. La traducció numèric-simbòlic és un camp obert on tenen cabuda diverses formulacions i metodologies. Una d'aquestes metodologies és la **Representació dels senyals basada en episodis**.

9.1 Conclusions generals.

En aquest treball s'han presentat les possibilitats, una formalització i diverses aproximacions de la representació dels senyals basada en episodis, i s'han proposat una nova formalització i una nova aproximació basada en aquesta formalització. També s'han estudiat els aspectes relacionats amb l'aplicació de la nova aproximació, exemplificats mitjançant la representació de diversos tipus de senyals.

La representació dels senyals basada en episodis, en general, respon a les necessitats dels Sistemes de Supervisió tant pel que fa a la representació dels senyals (des del punt de vista temporal i de qualificació) com a la representació del coneixement expert sobre ells. S'ha constatat que tant la formalització com les diferents aproximacions existents descriuen qualitativament els senyals a partir de la primera i segona derivades. Però també s'ha constatat que la primera definició d'episodi és més general i permet tenir en

compte altres característiques diferents de les derivades del senyal. A més, en les aproximacions descrites els canvis de signe es consideren canvis significatius, però pot haver-n'hi d'altres que siguin tant o més importants. Totes aquestes consideracions suggereixen la possibilitat de representar els senyals tenint en compte altres aspectes, de manera que sigui possible obtenir representacions més completes.

Per tant, s'ha elaborat una nova formalització, més general, de les representacions en episodis. Aquesta generalització permet obtenir representacions que reflecteixin no solament la dinàmica dels senyals, sinó també altres característiques que poden ser igualment importants, en funció del coneixement que els experts humans vulguin representar sobre els senyals.

Els conceptes més importants de la nova formalització són els de **funció característica i interval característic**, que permeten definir les característiques del senyal a partir de les quals s'elabora la seva representació. Aquestes característiques donen lloc a una **classificació fonamental**, el conjunt d'episodis en què es pot dividir qualsevol senyal. En la pràctica, per enriquir la representació però no per augmentar el nombre d'episodis en què es divideix un senyal, pot ser necessari tenir en compte altres característiques, anomenades **característiques auxiliars**, que donen lloc a una conjunt més gran (i més significatiu) d'episodis, la **classificació útil**. La nova formalització permet descriure les aproximacions a la representació en episodis que es basen en episodis maximals, determinats sempre per les mateixes característiques, i que donen lloc a representacions úniques del senyal. Altres aproximacions que no tenen en compte aquestes consideracions queden excloses d'aquesta generalització.

Les principals característiques de la nova representació (elaborada a partir de la nova formalització) són que, utilitzant una sola funció característica (la segona derivada), es poden representar correctament els trets fonamentals de la dinàmica dels senyals, com són les oscil·lacions (\cap, \cup), els períodes de creixement ($(, /,)$) o decreixement (\backslash, \setminus) i, principalment, des del punt de vista de la Supervisió de processos, els períodes d'estabilitat, representats per episodis de tipus $-$, i les discontinuïtats, molt representatives per a la detecció de fallades. La nova representació té algunes característiques pròpies i altres que són comunes a altres representacions, si bé és l'única que les agrupa totes. La diferència principal entre la nova representació i totes les altres són els episodis de discontinuïtat i els d'inflexió.

Els diferents exemples presentats permeten arribar a la conclusió que es poden fer els mateixos comentaris de cada cas tant observant els senyals com a partir de les representacions. Això indica que les representacions serveixen per descriure adequadament els senyals, amb l'avantatge que poden ser fàcilment utilitzades per eines de Detecció o Diagnosi com Sistemes Experts o Classificadors.

Un altre dels aspectes estudiats en aquest treball és l'obtenció en línia de la representació dels senyals en episodis. L'obtenció i el tractament de dades en línia són necessaris en molts casos en la Detecció o Diagnosi de fallades i, en general, en totes les tasques de Supervisió. La principal característica del mètode presentat per obtenir-la és que els resultats obtinguts fora de línia i en línia no presenten diferències significatives. Això permet utilitzar la representació fora de línia per analitzar el procés i per dissenyar el Sistema de Supervisió i la representació en línia, si cal, per dur a terme la Supervisió.

També es pot destacar que el mètode utilitzat (que inclou raonament difús) permet obtenir no solament el tipus d'episodi a cada instant, sinó també la certesa per a tots els tipus possibles, la qual cosa enriqueix la informació que s'obté del senyal.

Els principals problemes que presenta l'obtenció de la representació són la determinació dels paràmetres que cal ajustar i la presència de soroll en els senyals. Aquests aspectes han estat tractats i s'han presentat solucions que redueixen la seva importància.

9.2 Treball futur.

Els treballs futurs relacionats amb el treball presentat haurien de centrar-se principalment en dos punts, relacionats entre ells:

I. Desenvolupament de les eines descrites. En aquest treball es proposa un formalisme general per a les representacions en episodis i un tipus concret de representació basat en aquest formalisme. Aquestes dues aportacions assenyalen dos camins diferents:

- Desenvolupament d'altres tipus de representacions basades en el formalisme descrit, en funció de les necessitats de problemes concrets. La possibilitat d'obtenir representacions dels senyals basades en altres característiques diferents de les derivades s'ha comentat però no s'ha desenvolupat. L'elecció d'altres funcions característiques és un camí obert que pot aportar noves solucions i sobre el que cal experimentar.
- Millora de la representació basada en la segona derivada. Ja s'han comentat, i en part solucionat, alguns problemes com el filtratge del soroll i la tria dels límits dels intervals característics. Però, sens dubte, el fet que no s'hagin presentat solucions definitives a aquests problemes fa que la millora de les solucions presentades i la recerca de solucions alternatives sigui un camí en què cal seguir treballant.

II. Aplicació de les eines descrites en problemes concrets per tal de trobar la mesura real de la seves virtuts i limitacions. L'objectiu final del treball és el de facilitar les tasques dels Sistemes de Decisió (Sistemes Experts, Classificadors ...). En aquest sentit, ja s'ha comprovat que es poden representar els senyals d'una manera prou simplificada i alhora prou completa. El següent pas és la utilització de la representació per aquests Sistemes de Decisió, que poden delimitar noves necessitats per a les eines desenvolupades. Una manera d'analitzar aquestes necessitats és mitjançant un enfocament pràctic. Alguns dels actuals i futurs camps d'aplicació es descriuen en les seccions següents. En qualsevol cas, les necessitats que es posin de manifest han de marcar les pautes que s'haurien de seguir en el primer punt.

Totes les propostes presentades en els punts anteriors també han de tenir en compte la integració en un entorn real de Supervisió, juntament amb altres eines, numèriques o qualitatives, d'abstracció, de representació de coneixements i de decisió.

A continuació es presenten dos treballs concrets en els quals actualment s'està treballant.

9.2.1 Diagnosi de fallades en circuits analògics (monoestable).

Aquest treball s'està portant a terme en l'actualitat i es basa en l'estudi d'un circuit electrònic, el monoestable, com a problema de referència en el camp de la Diagnosi de sistemes analògics [21]. El monoestable (Fig. 9-1) és un sistema en el qual els transistors són fonamentals per a la Diagnosi i que, per tant, cal estudiar des d'un punt de vista dinàmic. Al mateix temps el fet que els components que hi intervenen presentin toleràncies entorn de valors nominals fa que sigui difícil obtenir-ne un bon model i, com a conseqüència, utilitzar mètodes de Diagnosi basats en models. Per aquests motius, s'ha escollit aquest sistema com un bon camp de proves per a la representació en episodis.

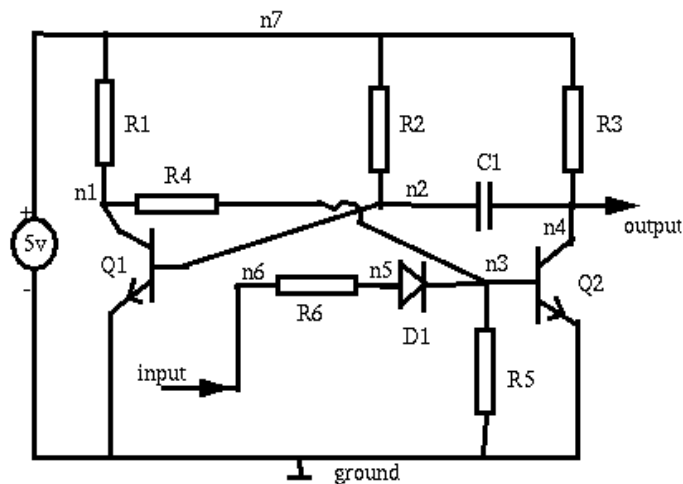


Fig. 9-1 Circuit Monoestable

El circuit monoestable és un sistema àmpliament conegut, sobre el qual s'han obtingut molts resultats, però que encara representa un problema obert. A [18] es pot trobar la descripció del sistema, bibliografia relacionada i una col·lecció d'escenaris en què es representen un total de 80 fallades diferents corresponents a canvis en els valors dels components, que poden anar des de curtcircuits fins a circuits oberts. Per diagnosticar les fallades es disposa del senyal en els sis nodes del circuit ($n1, \dots, n6$ en la figura).

Per provar la utilitat de la representació en episodis descrita en aquest treball s'ha obtingut la representació dels senyals en els sis nodes en els 80 escenaris descrits. En aquest cas els senyals s'han obtingut a partir de simulacions del circuit i s'han analitzat fora de línia.

El principal problema que s'ha observat és la dificultat de trobar els intervals característics que permetin obtenir bones representacions dels senyals en tots els casos. El fet de representar moltes situacions diferents fa que petits canvis en els intervals característics per obtenir representacions més bones d'alguns casos signifiquin també canvis no desitjats en els altres casos. Aquesta sensibilitat de les representacions als intervals característics és deguda, en aquest cas, a la necessitat de distingir entre molts casos, amb diferències mínimes entre alguns d'ells.

Els resultats obtinguts fins al moment són esperançadors; a partir de les representacions dels senyals es poden distingir gairebé tots els escenaris estudiats. Al mateix temps s'ha pogut comprovar la utilitat de la representació per a les eines de decisió, ja que en aquest cas s'ha utilitzat un classificador per diagnosticar les fallades.

Les dades utilitzades, obtingudes a partir de la representació, són la seqüència d'episodis i la durada i els valors màxim i mínim de cadascun. L'eina de decisió que diagnostica les fallades a partir d'aquestes dades és un classificador LAMBDA [75], que és una generalització difusa d'un classificador bayesià basat en una llei binomial. El classificador utilitza en primer lloc les seqüències per elaborar una primera classificació, i a continuació, si és necessari, utilitza les dades numèriques (durada, màxim i mínim) per acabar de distingir aquelles situacions en les quals el diagnòstic no és clar.

Els avantatges d'utilitzar la representació són que les mateixes fallades sempre donen lloc a la mateixa representació i que es redueix considerablement la quantitat de dades que s'han de tractar. Per poder diagnosticar tots els escenaris s'han utilitzat les representacions de tots ells per entrenar el classificador. Actualment, una vegada s'ha comprovat que es poden distingir tots els casos utilitzats per a l'entrenament, s'està treballant en la diagnosi d'altres situacions.

Com ja s'ha comentat, fins al moment només s'ha estudiat el sistema a partir de simulacions; per tant, no ha estat necessari cap filtratge del soroll. L'estudi del sistema real comporta la necessitat de filtrar els senyals i, per tant, alguns canvis en els intervals característics i en les representacions resultants. Aquest és un altre dels aspectes sobre els quals s'està treballant.

9.2.2 Integració en un entorn de Supervisió.

Altres camps, molt més amplis, en què cal continuar treballant són la integració de les eines descrites en un entorn real de Supervisió i la seva aplicació en processos industrials.

Els processos industrial es componen generalment de subsistemes dinàmics continus que proporcionen fluxos de productes que són utilitzats per altres subsistemes discontinus per a obtenir el producte final (que normalment és discret). El problema de la Supervisió global de la planta és que ha d'incloure el tractament de dades tan diverses com la satisfacció del clients i els senyals corresponents a les part contínua i discontinua. Els requeriments de qualitat del producte final són cada vegada més importants i, per tant, és necessari tenir-los en compte. Cal establir relacions entre les fallades detectades en el producte final i les condicions d'operació en les parts contínues i discontinues (Fig. 9-2).

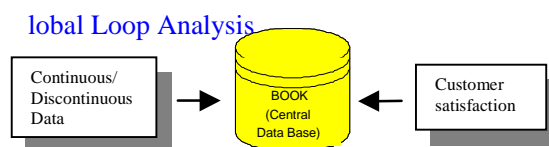


Fig. 9-2

La solució ha de passar per la utilització conjunta dels senyals que provenen de sistemes continus i discontinus i dels requeriments de qualitat final en una única representació. La representació dels senyals en episodis, des del punt de vista del formalisme general presentat en aquest treball, pot ser una eina útil per assolir aquest objectiu, perquè:

- El resultat final és una representació qualitativa, en funció de les característiques desitjades expressades en forma de funcions característiques i intervals característics. Aquest tipus d'informació pot ser semblant a les especificacions de qualitat final o de satisfacció dels clients.
- La representació en episodis és una seqüència d'esdeveniments semblant a les dades que poden arribar de les parts discontinues del procés.

Per tant, la representació en episodis pot permetre fer compatibles les dades procedents de la part contínua del procés amb les que provenen de la part discontinua i amb les que representin els requeriments del producte final. Aquest és un camp en el qual es pot experimentar en processos concrets per conèixer l'abast d'aquesta compatibilitat.

Evidentment, per poder utilitzar la representació en episodis per a la Supervisió de processos industrials cal integrar-la en un entorn de Supervisió juntament amb altres eines necessàries. En la Fig. 9-3 es presenta una arquitectura per a un entorn de CAD de Supervisió. En aquesta arquitectura es pot veure (encerclada) en quina part ha d'estar integrada la representació en episodis: les dades brutes del procés s'emmagatzemen en una **Base de Dades Històrica** que ha de subministrar altres dades més elaborades a una **Base de Dades Central (BOOK)**, que proveeix d'informació els sistemes de decisió. És al BOOK, on s'han de guardar les dades procedents de les parts contínua i discontinua i els requeriments del producte final.

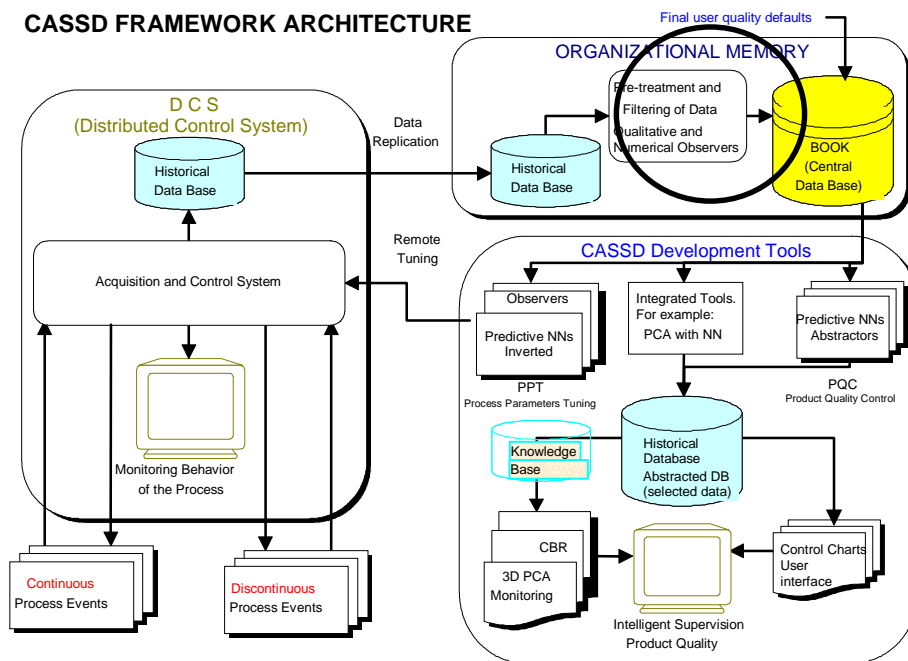


Fig. 9-3 Arquitectura del CAD de Supervisió

Aquestes idees de futur estan expressades en la proposta de projecte europeu IMS 29,703 ACKNOW *'Intelligent Supervision and Diagnosis of Modern Textile & Food Processes with Largely Unknown Behaviour'*. Actualment, en el marc del projecte CICYT TAP96-1114-C03-03 *'Plataformas Integradas de CAD de Supervisión y Metodologías'*, ja s'ha desenvolupat un entorn CASSD (*Computer-Aided Supervisory Systems Design*) [651] on es pot utilitzar conjuntament la representació en episodis i altres eines d'abstracció numèrica o qualitativa, Simulació Qualitativa (ALCMEN) i Sistemes Experts (CEES) dins l'entorn CACSD (*Computer-Aided Control Systems Design*) MATLAB-SIMULINK i utilitzant una metodologia orientada a objectes. De fet, per obtenir la representació en línia ja s'ha utilitzat aquest entorn.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Åström, K. J. , Anton, J. J. , Årzen, K. E., “Expert Control”, *Automatica*, vol. 22 num. 3, p. 277-286, 1986.
- [2] Aguilar Martin, J. , “Representación Simbólico Numérica para Sistemas Expertos de Control en Tiempo Real”, *Curso de Verano Universidad Internacional Menendez Pelayo*. Santander, 1991.
- [3] Aguilar-Martin J. , “Qualitative control, Diagnostic and Supervision of Complex Processes”, *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 36, p. 115-127, 1994.
- [4] Ayrolles L. , Aguilar-martin J., Guerin F., “Interprétation Symbolique pour la Supervision Multi-Résolution de Processus Dynamiques”, *Supervision de Processus à l'aide du Système Expert G2*, p. 73-90, Ed Hermes, 1995.
- [5] Ayrolles, L. , “Abstraction Temporelle et Interpretation Quantitative/Qualitative de Procesus a Dynamiques Multiples”, *These de Doctorat Universite Paul Sabatier*, Toulouse (France), 1996.
- [6] Bakshi B. R., G. Locher, G. Stephanopoulos and G. Stephanopoulos, “Analysis of Operating Data for Evaluation, Diagnosis and Control of Batch Operations”. *Journal of Process Control*. vol. 4, num. 4., p. 179-194, 1994.
- [7] Bakshi, B. R. and Stephanopoulos G. , “Representation of process trends”, parts III and IV, *Computers Chemical Engineering*, vol.18, num. 4, p. 267-302, 1994.
- [8] Basseville M., “Detecting changes in signals and systems- A survey”, *Automatica*, vol. 24, num. 3, p. 309-326, 1988.
- [9] Bobrow D. G., “Qualitative Reasoning about Physical Systems : an Introduction”, *Artificial Intelligence*, num. 24, p. 1-5, 1984.
- [10] Bousson K., “Raisonnement Causal pour la Supervision de Processus basée sur des Modèles”, *Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse*, 1993.
- [11] Cheung, J. T., Stephanopoulos G., “Representation of Process Trends”, parts I and II, *Computers Chemical Engineering*, vol.14, p. 495-540, 1990.

- [12] Chow E. Y. and Willsky A. S., “Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 29, p. 603-614, 1984.
- [13] Colomer J, Melendez, J, De la Rosa J. L., Aguilar, J., “A Qualitative/Quantitative Representation of Signals for Supervision of Continuous Systems”, *Proceedings of ECC97*, ECC382.pdf, Brussels, 1997.
- [14] Colomer J., “Abstracció d'Informació per a Supervisió Experta”, *1r Seminari de treball en Automàtica, Robòtica i Percepció*, Edicions UPC, 1996.
- [15] Colomer J., Meléndez J. i de la Rosa J. LL., “Abstracció : Eines per a obtenir Informació Significativa per a Supervisió Experta de Processos”, *SCIENTIA Gerundensis*, vol. 22, p. 169-183, Girona, 1996.
- [16] Colomer J., Meléndez J., de la Rosa J. LL., Vehí J. and Pous C., “Dealing with Qualitative Information for Supervisory Systems Design in CASSD frameworks”, *Proceedings of Control of Industrial Systems Conference*, vol. 3, p. 288-293, Belfort, 1997.
- [17] Colomer, J., C. Pous, J. Melendez, J. Ll. de la Rosa and J. Aguilar-Martin, “Abstracting Qualitative Information for Process Supervision”, *Proceedings of IEEE International symposium on CACSD*, p. 410-415., 1996.
- [18] Dague P., *The monostable reference problem* ,
<http://goma.univ-paris13.fr/membres/dague/monostable/>.
- [19] Dague P., “Numeric Reasoning with relative Orders of Magnitude”, *Proceedings of National Conference on Artificial Intelligence*, p. 541-547, 1993.
- [20] Dague P., “Qualitative Reasoning : a survey of Techniques and Applications”, *AICOM*, num. 8, 1995.
- [21] Dague P., Taillibert P., “The monostable: a reference problem for analog circuit diagnosis”, *7th International Workshop on Principles of Diagnosis DX 96*, Val Morin, Canada, 1996.
- [22] Danés P., “Interfasage Symbolique-Numérique dans la Simulation Qualitative des Systèmes Dynamiques”, *These de Doctorat Université Paul Sabatier*, Toulouse, France, 1995.
- [23] De Kleer J., Brown J. S., “A Qualitative Physics based on Confluences”, *Artificial Intelligence*, num. 24, p. 7-83, 1984.
- [24] De la Rosa J. Ll., 1994, “Heuristics for Cooperation of Expert Systems. Application to Process Control”, *Doctoral Thesis, Universitat de Girona*, Girona, 1994.
- [25] De la Rosa, J.Ll., J. Colomer and J. Melendez, “Qualitative Modelling for partially known Biotechnological Process”, *Current trends In Qualitative Reasoning and applications, Monografia CIMNE N° 33*, p. 114-119, Barcelona, 1995.

- [26] Denoeux, Masson and Debuissou, "System diagnosis using Pattern Recognition techniques", *Surveillance des systèmes continus, Ecole d'Eté d'Automatique de Grenoble*, vol. 1, 1996.
- [27] Dorf R.C., "Exploring Control Design Variables", *Proceedings of the American Control Conference*, p. 3062-3066, 1993.
- [28] Dubois D. E. and Prade M., "Order-of-magnitude reasoning with fuzzy relations", *Revue d'Intelligence artificielle*, vol. 3, num. 4, 1989.
- [29] Evangelos S., "Reality check for Data Mining", *IEEE Expert*, p. 26-33, 1996.
- [30] Famili A., Shen W., Weber R. and Simoudis E., "Data Preprocessing and Intelligent Data Analysis", *Intelligent Data Analysis*, vol. 1 num.1, <http://www.elsevier.com/locate/ida>, 1997.
- [31] Fayyad U. M., "Data Mining and Knowledge Discovery :Making sense out of data", *IEEE Expert*, p. 20-25, 1996.
- [32] Feray-Beaumont S., Gentil S., "Declarative Modelling for Process Supervision", *Revue d'intelligence artificielle*, vol. 3, num 4, p. 135-150, 1989.
- [33] Forbus K. D., "Qualitative Process Theory, *Artificial Intelligence*, num. 24, p. 85-168, 1984.
- [34] Foulloy, L. , Zavidovique, B. , "Towards Symbolic Process Control", *Automatica*, vol. 30, num. 3, pag. 379-390, 1994.
- [35] Foulloy, L. , Zavidovique, B. , "Using Qualitative Reasoning to write Expert Controllers", *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 3, num 4, pag. 151-173 , 1989.
- [36] Frank, P.M., "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey and some new results", *Automatica*, vol. 26, num. 3, p. 459-474, 1990.
- [37] Frank P. and Köp.en-Seliger, "New developments using AI in Fault Diagnosis", *IFAC/IMACS International Workshop*, Bled Slovenia, 1995.
- [38] Frank P., "Analytical and Qualitative Model-based Fault Diagnosis -A Survey and Some New Results", *European Journal of Control* ,num.2, p. 6-28, 1996.
- [39] Frank P., "Aplication of Fuzzy Logic to Process supervision and Fault Diagnosis", *Surveillance des systèmes continus, Ecole d'Eté d'Automatique de Grenoble*, vol. 2, 1996.
- [40] Gallager N. C. and Wise G. L., "A Theoretical Analysis of the properties of Median Filters", *IEEE Trans. Accoustics, Speech & Signal Proc.*, vol. 29, p. 1136, 1981.

- [41] Ganz C.A., Kolb P., Rickli M., "A Data Management Tool for Computed Aided Control Engineering", *Proceedings of the American Control Conference*, p. 3076-3080, 1993.
- [42] Gentil S., "Intelligence Artificielle pour la Surveillance des Procédés Continus", *Surveillance des systèmes continus, Ecole d'Été d'Automatique de Grenoble*, vol. 1, 1996.
- [43] Gesti J., *Curso de reparación de video*, Fonovisión, 1989.
- [44] Gopinath, R.A. , Burrus, C.S. , *Wavelets and Filter Banks, Wavelets : A Tutorial in Theory and Applications*, C.K. Chui, Academic Press, 1991.
- [45] Heinonen P. and Neuvo Y., FIR-Median Hybrid Filters, *IEEE Trans. Accoustics, Speech & Signal Proc.*, vol. 35, p. 832, 1987.
- [46] Ifeachor E. C. and Jervis B. W., *Digital Signal Processing. A practical approach*, Addison-Wesley, 1993.
- [47] Isermann and Ballé, "Trends in the application of Model Based Fault Detection and Diagnosis of Technical Processes", *13th Triennial World Congress*, ref. 7f-01 1, San Francisco, 1996.
- [48] Isermann R., "Fault Diagnosis of Machines via Parameter Estimation and knowledge Processing- Tutorial Paper", *Automatica*, vol. 29, num. 4, p. 815-835, 1993.
- [49] Isermann R., "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods- A Survey", *Automatica*, vol. 20, num. 4, p. 387-404, 1984.
- [50] Janusz M. and Venkatasubramanian V., "Automatic generation of qualitative description of process trends for fault detection and diagnosis", *Engng. Aplic. Artif. Intell.*, Vol. 4, p. 329-339, 1991.
- [51] Jorba A. i Masdemont J., *Introducció a la Simulació*, Edicions UPC, 1995.
- [52] Jovic, F. , *Expert Systems in Process Control*, Chapman & Hall, 1992.
- [53] Kharconekar P.P. Thomas L.T., "Fault Detection in the presence of Modelling Uncertainty", *Proceedings of the 32nd Conference of decision and control*, p. 1716-1720, 1993.
- [54] Konstantinov K. and Yoshida T., "Real-Time Qualitative Analysis of the Temporal Shapes of (Bio) Process Variables", *AIChE Journal*, vol. 38, num. 11, p. 1703-1715, 1992.
- [55] Kont, S., SEMA_DIAPAN, "Un Système Expert de Diagnostic de Pannes pour les Installations Industrielles Complexes", *Diagnostic et sûreté de fonctionnement*, vol. 3, num. 2, p. 187-204, 1993.

- [56] Kosanovich K. A. and Piovoso M. J., "PCA of Wavelet Transformed Process Data for Monitoring", *Intelligent Data Analysis*, vol. 1, num.2, <http://www.elsevier.com/locate/ida>, 1997.
- [57] Kuipers B., "Commonsense Reasoning about Causality : Deriving Behaviour from Structure", *Artificial Intelligence*, num. 24, p. 169-203, 1984.
- [58] Lancaster K., "The Scope of Qualitative Economics", *Review of Economics Studies*, vol. 29, p. 99-123, 1962.
- [59] Lawson Ch. L. and Hanson R. J., *Solving Least Squares Problems*, Prentice-Hall, 1974.
- [60] Leyval L., "Raisonnement Causal pour la Simulation de Procédés Industriels Continus", *Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble*, 1991.
- [61] Loveday G.C., *Diagnóstico de averias en electrónica*, Paraninfo, 1996.
- [62] Mallat S. G., "A Theory for Multiresolution Signal Descomposition: the Wavelet Transform", *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 11, n° 7, p. 674-693, 1989.
- [63] Mavrovouniotis L. and Stephanopoulos G., "Formal Order-of-Magnitude Reasoning in Process Engineering", *Computer Chemical Engineering*, num. 12, p. 867-880, 1988.
- [64] Meléndez J., Colomer J., de la Rosa J. LL., Aguilar-Martin J., Vehí J., "Embedding Objects into Matlab/Simulink for Process Supervision", *Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on CACSD*, p. 20-25, 1996.
- [65] Melendez J., "Integration of Knowledge-Based, Qualitative and Numeric tools for real-Time Dynamic Systems supervision", *Doctoral Thesis*, Universitat de Girona, Girona, 1998.
- [66] Millot P., "De la Surveillance à la Supervision : l'integration des Operateurs Humains", *Surveillance des systèmes continus, Ecole d'Eté d'Automatique de Grenoble*, vol. 1, 1996.
- [67] Missier A., "Structures Mathématiques pour le Calcul Qualitatif , Contribution à la Simulation Qualitative", *Doctorat de l'INSA de Toulouse*, 1991.
- [68] Montmain J., "Gentil S. Interprétation Qualitative pour le Diagnostic en ligne", *Diagnostic et sûreté de fonctionnement*, vol. 3, num 1, p. 23-45, 1993.
- [69] Ogata K., *Ingenieria de Control Moderna*, Prentice-Hall Iberoamericana, 1993.
- [70] Pal K. M., "Model Based Fault Detection", *Contribució al projecte TEMPUS MODIFY*, Duisburg, 1995.
- [71] Patton R., Frank P. and Clark R., *Fault Diagnosis in Dinamic Systems. Theory and applications*, Prentice Hall, 1989.

- [72] Patton R. J., "Robust Model-Based Fault Diagnosis :the state of the art", *Preprints of SAFEPROCESS'94*, vol. 1, p. 1-27, Finland, 1994.
- [73] Patton R. J. and Chen J., "A review of parity space approaches to Fault Diagnosis", *Preprints of SAFEPROCESS'91*, vol. 1, p. 239-255, 1991.
- [74] Philips, *Manual de servicio TVC*, Colección Auratrònica, Ed. Aura, 1990.
- [75] Piera N., Desroches Ph. and Aguilar-Martin, J., *LAMDA: An Incremental Conceptual Clustering System*, report LAAS/CNRS n. 89420, Toulouse, 1989.
- [76] Piera N., 'Current trends In Qualitative Reasoning and Application', *Monograph CIMNE N° 33*, Piera Ed., Barcelona (Spain), 1995.
- [77] Pijanowski B., *Pradnica i Regulator (ang. Electric generator and controler)*, Wydawnictwo Komunikacji i Lacznosci, Warszawa, 1991.
- [78] Pous C., Xargayó J., Colomer J., Meléndez J., Vehí J. and Rustullet M., "Extracting qualitative information from a real process", *Proceedings of Control of Industrial Systems Conference*, vol. 2, p. 455-460, Belfort, 1997.
- [79] Ragot J., Maquin D., Darouach M. et Bloch G., *Validation de données et diagnostic*, Hermes, 1990.
- [80] Rainman O., "Order of magnitude reasonig", *Proceedings of AAAI-86, National Conference on Artificial Intelligence*, p. 100-104, 1986.
- [81] Rakoto-Ravalontsalama N., "Sur l'interface numerique-symbolique dans un schema de supervision de systemes dinamiques a l'aide de systemes experts", *These de Doctorat Universite Paul Sabatier*, Toulouse, 1993.
- [82] Rengasamy R. and Vekatasubramanian V., "A syntactic pattern-recognition approach for process monitoring and fault diagnosis", *Engineering applications of Artificial Intelligence*, vol. 8, num. 1, p. 35-51, 1995.
- [83] Rengasamy R., "Aframework for integrating process monitoring, diagnosis and supervisory control", *Doctoral Thesis*, PurdueUniversity, 1995.
- [84] Sarrate R. et al., "Generación de eventos por análisis de datos basado en ventanas deslizantes", *XVI Jornadas de Automática*, Donostia ,1995.
- [85] Sarrate, R., J. Aguilar, "Window-based quantitative-to-qualitative interface for intelligent supervisory systems", *Proceedings of ESM '96*, p. 724-728, Budapest, 1996.
- [86] Shen Q. and Leitch R., "Fuzzy qualitative simulation", *IEEE Trans. Systems Man Cybernetics*, vol. 23, num.4, 1993.
- [87] Stock M., *AI in Process Control*, McGraw-Hill, 1989.

- [88] Tarifa, E.E. and Scenna, N. J., “A fault diagnosis prototype for a bioreactor for bioinsecticide production”, *Reliability Engineering and System Safety*, num. 48, p. 27-45, 1995.
- [89] Travé-Massuyés, L. and Piera, N., *The orders of magnitude as qualitative algebras*, 11th IJCAI, Detroit, USA, 1989.
- [90] Travé-Massuyés L., Dague P., Guerrin F., *Le raisonnement qualitatif*, *Hermes*, 1997.
- [91] Venkatasubramanian V., Vaidyanathan R. and Yamamoto Y., “Process fault detection and diagnosis using neural networks : Steady state processes”, *Comput & Chem. Engng*, vol. 14, num. 7, p. 699-712, 1990.
- [92] Williams, B.C., “Doing Time : Putting qualitative reasoning on firmer ground”, *Proceedings of AAAI-86, National Conference on Artificial Intelligence*, p.105-112, 1986.
- [93] Willsky A.S., A Survey of Design Methods for Failure detection in Dynamic Systems, *Automatica*, vol 12, pp 601-611, 1976.