

## Capítol 4

# Aplicacions pràctiques del SIS

En aquest capítol es descriuen diverses aplicacions pràctiques de la metodologia de disseny del SIS.

Primer de tot, es presenta l'entorn de desenvolupament en el que s'implementen els SIS. Es tracta del programari MATLAB<sup>®</sup>. La detecció d'esdeveniments significatius s'implementa mitjançant *S-Functions* en blocs de SIMULINK<sup>®</sup>. D'altra banda, els models a esdeveniments discrets s'implementen en STATEFLOW<sup>™</sup>. També es presenta una eina útil per al disseny de models a esdeveniments discrets: el CTCT.

A continuació, es dissenyen dos SIS. El primer, per identificar l'estat fisiològic d'un procés biotecnològic. El segon, per determinar l'estat de funcionament d'una fresadora. Amb aquests exemples es pretén il·lustrar l'aplicació de la metodologia completa de disseny d'un SIS, comprnent tant la interfície com el supervisor (veure fig. 5).

### 4.1 Entorn informàtic de desenvolupament

#### 4.1.1 Detecció d'esdeveniments significatius mitjançant S-functions

En el Capítol 2 s'ha presentat una metodologia per a la detecció d'esdeveniments significatius. Aquesta metodologia es basa en el disseny modular de camins de detecció  $\mathcal{CD}$ . El procés de disseny consisteix en programar analitzadors basats en finestres  $\mathfrak{A}$ , encadenar-los segons convingui i configurar-los. Per exemple, la fig. 4.1 mostra un camí de detecció constituït per 2 analitzadors basats en finestres  $\mathfrak{A}_1$ ,  $\mathfrak{A}_2$ , i un detector  $\mathcal{D}$ .

Aquesta filosofia de disseny fa pensar en la idoneïtat d'una implementació modular mitjançant blocs. Un entorn informàtic que afavoreix la programació de blocs i el seu encadenament és SIMULINK<sup>®</sup>.

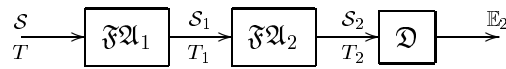


Figura 4.1: Esquema d'un camí de detecció.

Com a punt de partida, s'ha creat una llibreria anomenada ABSALON que reuneix diversos blocs útils per dissenyar camins de detecció (veure fig. 4.2). ABSALON respon a les sigles d'*Abstraction analysis on-line*, és a dir, anàlisi basat en l'abstracció en línia. Fa referència al procés d'abstracció d'informació, que s'aconsegueix mitjançant l'encadenament dels diversos blocs de la llibreria.

## ABSALON: ABStraction AnaLysis ON-line

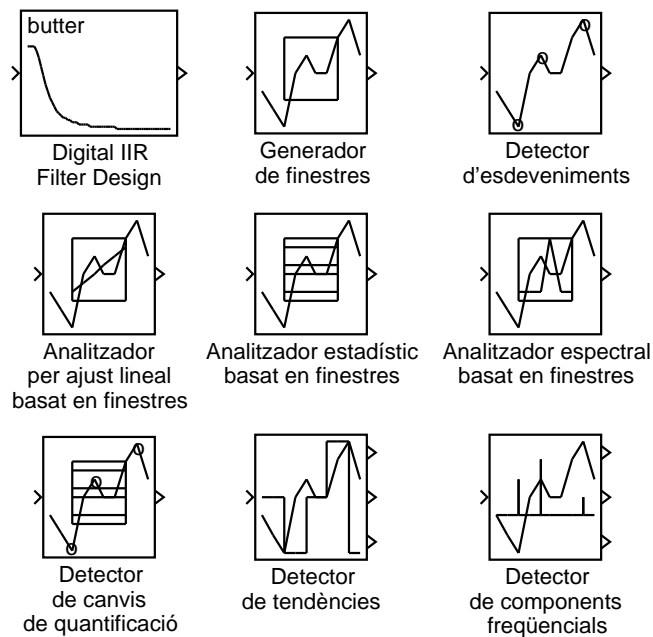


Figura 4.2: Llibreria ABSALON

Els blocs de la llibreria ABSALON han estat programats com a *S-Functions*. Les *S-Functions* permeten introduir algorismes propis a models de SIMULINK<sup>®</sup>. Els algorismes es poden escriure en MATLAB<sup>®</sup> o C. Tanmateix, els blocs de la llibreria ABSALON han estat programats en C, ja que comporta una execució més ràpida, apropiada pel funcionament en línia.

Una *S-Function* és una descripció d'un sistema dinàmic mitjançant un

llenguatge de programació. Les *S-Functions* utilitzen una sintaxi de crida especial que permet interactuar amb els solucionadors d'equacions de SIMULINK<sup>®</sup>. Una *S-Function* pot acomodar sistemes continus, discrets o híbrids.

Un cop s'ha programat l'algorisme en C, es compila com a DLL i s'incorpora al model de SIMULINK<sup>®</sup> mitjançant el bloc *S-Function*. El compilador que s'ha utilitzat per obtenir les DLL ha estat el WATCOM<sup>™</sup> C/C++. Es pot utilitzar la possibilitat d'emascament de SIMULINK<sup>®</sup> per crear caixes de diàleg i icones personalitzades pels blocs *S-Function*. D'aquesta forma, se'ls pot donar una aparença molt semblant als blocs de les llibreries pròpies de SIMULINK<sup>®</sup>.

La llibreria ABSALON es compon de 9 blocs. A la majoria d'ells s'ha fet referència en els diversos apartats del Capítol 2. A continuació es descriuen tots:

**Digital IIR Filter Design (butter).** Permet realitzar un filtrat digital tipus butterworth d'un senyal. És l'únic bloc que no s'ha implementat, sinó que pertany a la *Signal Processing Toolbox* de MATLAB<sup>®</sup>. S'ha integrat dins la llibreria ABSALON ja que molt sovint interessarà filtrar els senyals mesurats.

**Generador de finestres.** Implementa un generador de finestres  $\mathfrak{F}$  (veure def. 2.1.3). Com a paràmetres té: l'amplada de la finestra, el desplaçament de la finestra i el període de mostreig del senyal d'entrada. S'ha implementat mitjançant la *S-Function* *window.c*.

**Detector d'esdeveniments.** Implementa un detector d'esdeveniments  $\mathfrak{D}$  (veure def. 2.5.5). Com a paràmetres té: l'univers de magnituds qualitatives del senyal (o conjunt d'etiquetes), la magnitud que permet inicialitzar l'algorisme de detecció (o etiqueta inicial), la matriu de canvis que expressa els esdeveniments significatius que es volen detectar i el tracte que han de rebre les discontinuïtats (*i.e.*, ignorar, detectar o interpolar; veure la pàg. 86). Aquest bloc genera un senyal associat a cada esdeveniment significatiu. Cada senyal notifica la detecció de l'esdeveniment corresponent mitjançant un flanc alternatiu de pujada o de baixada. S'ha implementat mitjançant la *S-Function* *event.c*.

**Analitzador per ajust lineal basat en finestres.** Implementa un exemple d'analitzador basat en finestres relacionat amb l'ajust lineal (veure l'apartat 2.2.1). Com a paràmetres té: l'atribut de sortida (*i.e.*, *pendent* o *dispersió lineal*), i els paràmetres del generador de finestres. S'ha implementat encadenant les *S-Functions* *window.c* i *linear.c*.

**Analitzador estadístic basat en finestres.** Implementa un exemple d'analitzador basat en finestres relacionat amb càlculs estadístics (veure

l'apartat 2.2.2). Com a possibles paràmetres té: l'atribut de sortida (i.e., *moda* o *entropia*), el conjunt de llindars, el conjunt d'etiquetes (associat a l'atribut *moda*) i els paràmetres del generador de finestres. S'ha implementat encadenant les *S-Functions* `window.c` i `stats.c`.

**Analitzador espectral basat en finestres.** Implementa un exemple d'analitzador basat en finestres relacionat amb l'estudi del contingut freqüencial d'un senyal (veure l'apartat 2.2.3). Com a possibles paràmetres té: l'atribut de sortida (i.e., *màxima component* o *component seleccionada*), la freqüència seleccionada i el marge de tolerància (ambdós associats a l'atribut *component seleccionada*), i els paràmetres del generador de finestres. S'ha implementat encadenant les *S-Functions* `window.c` i `spectral.c`.

**Detector de canvis de quantificació.** Implementa un exemple de camí de detecció. Encadena un camí d'anàlisi constituït per un analitzador estadístic basat en finestres i un detector d'esdeveniments. L'analitzador estadístic basat en finestres calcula l'atribut *moda*. Serveix per quantificar el senyal d'entrada i detectar-ne canvis. Com a paràmetres té: el conjunt de llindars, el conjunt d'etiquetes, l'etiqueta que permet inicialitzar l'algorisme de detecció, la matriu de canvis que expressa els esdeveniments significatius que es volen detectar, el tracte que han de rebre les discontinuïtats (i.e., ignorar, detectar o interpolar; veure la pàg. 86) i els paràmetres del generador de finestres. S'ha implementat encadenant les *S-Functions* `window.c`, `stats.c` i `event.c`.

**Detector de tendències.** Implementa simultàniament un exemple de camí d'anàlisi i de detecció de tendències (veure els apartats 2.4.1 i 2.6.1, respectivament). Serveix per detectar canvis de pendent en el senyal d'entrada. Com a paràmetres té: el conjunt de llindars, el conjunt d'etiquetes, l'etiqueta que permet inicialitzar l'algorisme de detecció, la matriu de canvis que expressa els esdeveniments significatius que es volen detectar, el tracte que han de rebre les discontinuïtats (i.e., ignorar, detectar o interpolar; veure la pàg. 86), i els paràmetres dels dos generadors de finestres. S'ha implementat encadenant les *S-Functions* `window.c`, `linear.c`, `window.c`, `stats.c` i `event.c`. Té tres sortides: la primera correspon a la sortida del generador de finestres, la segona a la sortida del camí d'anàlisi i la tercera a la sortida del camí de detecció.

**Detector de components freqüencials.** Implementa simultàniament un exemple de camí d'anàlisi i de detecció de components freqüencials (veure els apartats 2.4.2 i 2.6.2, respectivament). Serveix per indicar el grau de presència d'una determinada component freqüencial en el senyal d'entrada. Com a paràmetres té: la freqüència seleccionada, el marge de tolerància, el conjunt de llindars, el conjunt d'etiquetes,

l'etiqueta que permet inicialitzar l'algorisme de detecció, la matriu de canvis que expressa els esdeveniments significatius que es volen detectar, el tracte que han de rebre les discontinuïtats (*i.e.*, ignorar, detectar o interpolar; veure la pàg. 86), i els paràmetres dels dos generadors de finestres. S'ha implementat encadenant les *S-Functions* `window.c`, `spectral.c`, `window.c`, `stats.c` i `event.c`. Té tres sortides: la primera correspon a la sortida del generador de finestres, la segona a la sortida del camí d'anàlisi i la tercera a la sortida del camí de detecció.

Totes les *S-Functions* a que s'ha fet referència han estat incloses al CD-ROM (veure l'Apèndix A) per a que puguin ésser consultades, si es creu convenient.

La llibreria integra un detector de canvis de quantificació, un detector de tendències i un detector de components freqüencials. Si l'aplicació de supervisió necessita de nous camins de detecció s'hauran de programar. De fet, només caldrà programar analitzadors de finestres  $\mathfrak{A}$  mitjançant *S-Functions*, prenent com a model els exemples `linear.c`, `stats.c` o `spectral.c`. Després, es podran derivar els analitzadors basats en finestres amb l'ajuda del bloc generador de finestres. Finalment, es podrà compondre el camí de detecció desitjat mitjançant l'adequat encadenament d'analitzadors basats en finestres, i l'ajuda d'un bloc detector d'esdeveniments. En aquest darrer pas, caldrà tenir present que el bloc detector d'esdeveniments només pot anar a continuació d'un bloc analitzador basat en finestres que proporcioni un senyal de magnitud qualitativa.

A part de guiar-se pels exemples desenvolupats en la llibreria ABSALON, convindrà consultar el manual de SIMULINK<sup>®</sup> sobre *S-Functions* [8].

La llibreria de SIMULINK<sup>®</sup> ABSALON ha estat inclosa al CD-ROM (veure l'Apèndix A), per a que pugui ser utilitzada en el disseny del SIS en futures aplicacions.

#### 4.1.2 Implementació de sistemes a esdeveniments discrets mitjançant Stateflow<sup>™</sup>

En el Capítol 3 s'ha presentat una metodologia per a l'obtenció d'un model a esdeveniments discrets del procés. Aquest model és un generador que ha de servir per què el SIS determini l'estat del procés.

Un generador es una màquina d'estats que es compon d'estats i transicions. Un entorn informàtic que facilita la programació d'autòmats i la seva execució és STATEFLOW<sup>™</sup>.

STATEFLOW<sup>™</sup> és una potent eina de disseny i desenvolupament gràfic, que permet resoldre complexos problemes lògics de control i supervisió. Amb STATEFLOW<sup>™</sup> es poden modelar visualment i simular sistemes reactius complexos basats en la teoria de les màquines d'estat finit.

STATEFLOW<sup>TM</sup> permet utilitzar no només la notació d'estats i transicions, sinó també la notació dels diagrames de flux. Utilitza una variant de la notació de les màquines d'estat finit: els *Statecharts*. Aquesta variant ha estat referenciada en l'apartat 1.3, i introduïda en l'Apèndix D.

STATEFLOW<sup>TM</sup> proporciona un bloc de SIMULINK<sup>®</sup> en el que es pot representar i simular un diagrama. Aquest bloc es pot integrar amb altres blocs de SIMULINK<sup>®</sup> a través d'entrades i de sortides.

Amb cada diagrama de STATEFLOW<sup>TM</sup>, s'associa una base de dades constituïda per les variables i els esdeveniments que intervenen en el model.

La fig. 4.3 mostra un bloc de STATEFLOW<sup>TM</sup> amb un entrada associada a esdeveniments i una sortida associada a una variable anomenada *Estat*. Els esdeveniments estan multiplexats a diferents ports d'una mateixa entrada.

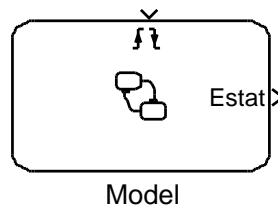


Figura 4.3: Bloc de SIMULINK<sup>®</sup> que representa un diagrama de STATEFLOW<sup>TM</sup>

Dins aquest bloc es pot representar un model a esdeveniments discrets com el de la fig. 4.4<sup>1</sup>. Aquest model consta de 18 estats: *N1*, *N2*, *S1*, *S2*, *I1*, *I2*, *E1*, *E2*, *E3*, *E4*, *ES1*, *ES2*, *ES3*, *ES4*, *EI1*, *EI2*, *EI3*, i *EI4*. L'estat inicial és el *I1*. Hi han 34 transicions corresponents a 10 esdeveniments associats a 10 ports de l'entrada: *Cb* (1), *Ca* (2), *NId* (3), *NIa* (4), *NSd* (5), *NSa* (6), *Vt* (7), *Vo* (8), *Bd* (9) i *Ba* (10). En cada estat s'estableix el valor de la variable de sortida *Estat*. Per exemple, a l'estat *ES2* li correspon el valor de sortida 4.

En SIMULINK<sup>®</sup> els esdeveniments es poden representar de diverses maneres:

- mitjançant un flanc de pujada en un senyal,
- mitjançant un flanc de baixada en un senyal,
- mitjançant un flanc de pujada o baixada indistintament en un senyal, o bé
- mitjançant la crida a una funció.

<sup>1</sup>Per aquest exemple, s'ha aprofitat el mateix model de la fig. 3.19



### 4.1.3 Disseny de sistemes a esdeveniments discrets mitjançant CTCT

STATEFLOW<sup>TM</sup> no permet ni l'anàlisi ni la manipulació dels models representats. Per exemple, no permet verificar propietats del model com el no bloqueig o la seguretat. Tampoc es poden realitzar operacions com la poda o la composició paral·lela. De fet, aquest darrer inconvenient es deu als Statecharts (veure l'apartat 1.3 i l'Apèndix D). És a dir, és una eina d'implementació, però no de disseny. CTCT és una eina informàtica que permet complementar STATEFLOW<sup>TM</sup> amb aspectes com aquests.

CTCT és un programari de lliure distribució desenvolupat pel Grup de Control de la Universitat de Toronto. Ha estat ideat amb l'objectiu de donar suport en el disseny de DES supervisors, en el marc de la Teoria del Control Supervisor[86][108]. De CTCT convé destacar que permet:

- representar DES mitjançant generadors,
- realitzar operacions com la poda i la composició paral·lela,
- comprovar l'accessibilitat i co-accessibilitat,
- dissenyar supervisors d'acord amb la teoria del control supervisor, i
- dissenyar sistemes de supervisió jerarquitats.

Per tant, CTCT és una eina de gran utilitat per aplicar la metodologia de síntesi d'un model a esdeveniments discrets del procés (veure l'apartat 3.3). Permet representar els components, les diferents restriccions físiques i de control, i realitzar les operacions de composició paral·lela que permetran obtenir el model en llaç tancat de la planta.

Per a més informació sobre aquest programari, així com per obtenir-ne un còpia del fitxer d'instal·lació, es pot consultar la pàgina web d'en Wonham [2].

## 4.2 Supervisió d'un procés biotecnològic de producció de llevat

### 4.2.1 Descripció del procés

Es vol dissenyar un SIS per a un procés biotecnològic de producció de llevat *Saccharomyces cerevisiae*. *Saccharomyces cerevisiae* és el llevat més extensament utilitzat per l'home des de fa centenars d'anys en la preparació del vi, la cervesa o el pa. En el món industrial el seu interès ha crescut gràcies a noves aplicacions en el camp de la genètica. Avui en dia, intervé fins i tot en la producció de proteïnes recombinants com l'antígen de l'hepatitis B.



Un procés biotecnològic té per finalitat fer créixer la població de microorganismes (i.e., la *biomassa*) amb l'ajut de certs substrats carbonats, a l'interior d'un bioreactor, en condicions físico-químiques (temperatura, pH, etc.) favorables (veure fig. 4.5). Aquest cultiu es pot destinar a la producció de massa cel·lular, a la producció de substàncies orgàniques resultants de l'activitat metabòlica dels microorganismes, o a l'extracció de certs pol·luents del líquid nutritiu.

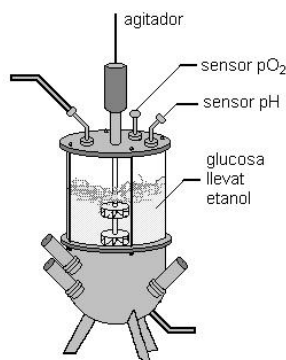


Figura 4.5: Un bioreactor per a experiències de laboratori.

Típicament, la producció de llevat es realitza mitjançant un procediment discontinu (i.e., *batch*) seguit d'un procediment continu. En l'operació discontinua, tot el medi nutritiu està present des d'un bon començament. Llavors, s'inicien un conjunt de transformacions bioquímiques fins exhaurir el medi nutritiu, moment en que finalitza la operació. Tot seguit, en el procediment continu, el medi nutritiu s'introdueix sense interrupció al bioreactor, i els productes es recuperen permanentment. Això implica una realització simultània de totes les etapes de transformació bioquímica, i un augment continu del llevat.

Pels microbiòlegs, poder fer un seguiment del procediment *batch* té gran interès científic i industrial, ja que pot induir certs fenòmens en l'operació contínua, com la sincronització del brot dels llevats. Aquesta necessitat pot ser satisfeta precisament per un sistema de supervisió.

El procés que es vol considerar ha estat objecte d'estudi al Centre de Bioenginyeria Gilbert Durant a l'INSA de Toulouse. Durant el procediment *batch* els microorganismes transcorren per diversos estats fisiològics. Inicialment s'introdueix un petit cultiu de microorganismes (i.e., l'*inoculum*) en un bioreactor de 1.5 l ple d'un medi ric en substrat. La glucosa és el substrat utilitzat. Durant una primera fase, i gràcies a un metabolisme fermentador, els microorganismes consumeixen la glucosa i produeixen etanol. En aquesta fase la biomassa creix d'una manera exponencial. Un cop exhaurida la glucosa inicial, el llevat pateix una adaptació metabòlica coneguda

per *diòxia* que li habilita el consum de l'etanol. Llavors, el llevat entra en un estat metabòlic oxidatiu, utilitzant l'etanol com a font de carboni pel seu creixement. El procediment discontinu finalitza quan s'ha consumit tot l'etanol.

Durant tot l'experiment, la temperatura del medi es manté regulada a 30°C i el pH a 4 o 5 mitjançant l'addició de base (NaOH). L'agitació i l'aportació d'oxigen al reactor, són ajustats manualment i modificats de manera arbitrària per l'expert a partir dels seus coneixements heurístics del procés i de la instal·lació.

Malgrat tots els esforços considerables realitzats en el modelatge i control dels processos biotecnològics, la complexitat dels sistemes microbians és encara molt superior a la capacitat dels mètodes matemàtics utilitzats. Un dels principals problemes que sorgeixen al voler controlar aquests processos és la variabilitat dels sistemes biològics. Aquest fenomen indueix un canvi en el comportament i les necessitats dels microorganismes, propiciant l'aparició de variacions estructurals, predictibles o no, en el model utilitzat.

Així, el model d'un procés biotecnològic per a la supervisió pot esdevenir tant complex que és impossible descriure'l correctament únicament a partir de models matemàtics convencionals basats en equacions diferencials o en derivades parcials. Encara que sigui possible representar-lo molt detalladament mitjançant equacions diferencials no lineals complexes, pot ser que, a causa d'aquest model, l'anàlisi subseqüent i les tasques de supervisió esdevinguin molt complexes o impossibles de realitzar en línia.

Per tant, es fa necessari establir una bona relació entre la complexitat del model utilitzat i la capacitat de realitzar l'anàlisi del sistema a partir d'aquest model. En aquest treball es proposa obtenir un model comportamental del procés com a màquina d'estats finits. Aquesta idea no és nova. A [13][102][103][104][105], es va utilitzar l'algorisme de classificació LAMDA per a construir un autòmat que modelava un procés biotecnològic. En el següent apartat, es farà ús de la metodologia descrita en els capítols precedents per a concebre un SIS que sigui capaç d'identificar en línia l'estat fisiològic del procés durant un experiment *batch*.

Com a dificultat afegida, cal tenir present que no es disposa d'una mesura directa en línia de les variables biològiques del procés. Per tant, s'haurà de poder detectar l'estat de funcionament a partir de les mesures disponibles, corresponents majoritàriament a variables ambientals.

#### 4.2.2 Disseny del SIS

Com a punt de partida es disposa d'un conjunt de senyals mesurats i del coneixement heurístic de l'operador expert. La preparació i la posada en marxa dels experiments de recerca microbiològica és lenta i laboriosa. Es disposa de dades de cinc operacions realitzades en una unitat pilot en procés d'instrumentació. Anomenem aquestes operacions *batch A, B, C, D i E*.

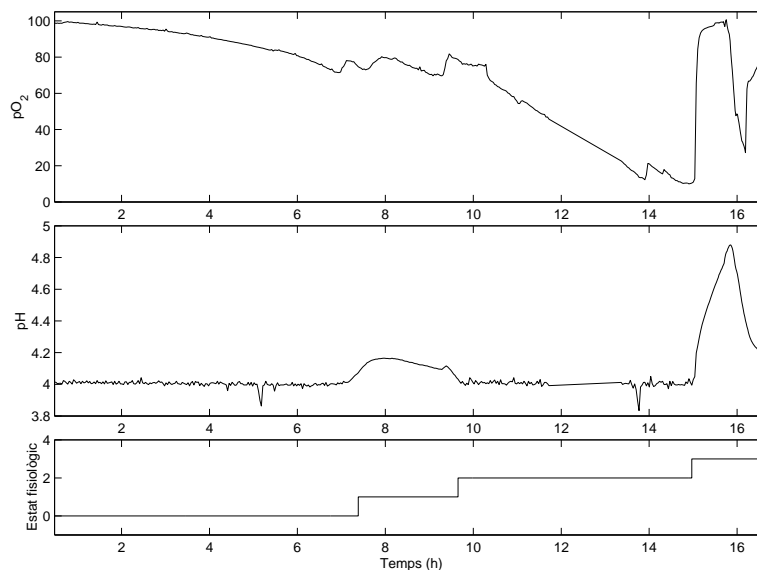


Figura 4.6: Senyals  $pO_2$  i  $pH$ , i els estats fisiològics corresponents al *batch C*: 0 – Fermentació, 1 – Diòxia, 2 – Oxidació i 3 – Continu.

Per exemple, la fig. 4.6 mostra les corbes corresponents al *batch D*<sup>2</sup>. Es pot observar l'evolució de dos senyals mesurats durant 15 h: la pressió parcial d'oxigen  $pO_2$  i el  $pH$ . El primer mesura el percentatge d'oxigen dissolt en el medi líquid respecte a una oxigenació màxima, per a la que el sensor ha estat calibrat en absència de microorganismes.

Tot i la complexitat del procés, l'operador expert pot identificar l'estat fisiològic dels microorganismes a partir de l'observació d'aquests dos senyals únicament. La fig. 4.6 també mostra l'estat fisiològic estimat per l'expert:

- (0) **Fermentació.** Etapa caracteritzada pel consum de glucosa i la producció d'etanol.
- (1) **Diòxia.** Etapa d'adaptació metabòlica.
- (2) **Oxidació.** Etapa caracteritzada pel consum d'etanol.
- (3) **Continu.** Finalitza el procediment *batch* i s'inicia el procediment continu.

La dinàmica d'aquests dos senyals en cada etapa és fàcilment reconeixible. En altres experiments, aquesta dinàmica es repeteix aproximadament. Per

<sup>2</sup>Per manca de dades s'ha hagut d'interpol·lar durant una hora a partir de les 12 h aproximadament. No obstant, la dinàmica representativa no s'ha vist afectada i les dades continuen essent vàlides.

exemple, la fig. 4.7 mostra les corbes corresponents al *batch E*. Les gràfiques corresponents a altres experiments es mostren en l'Apèndix B.

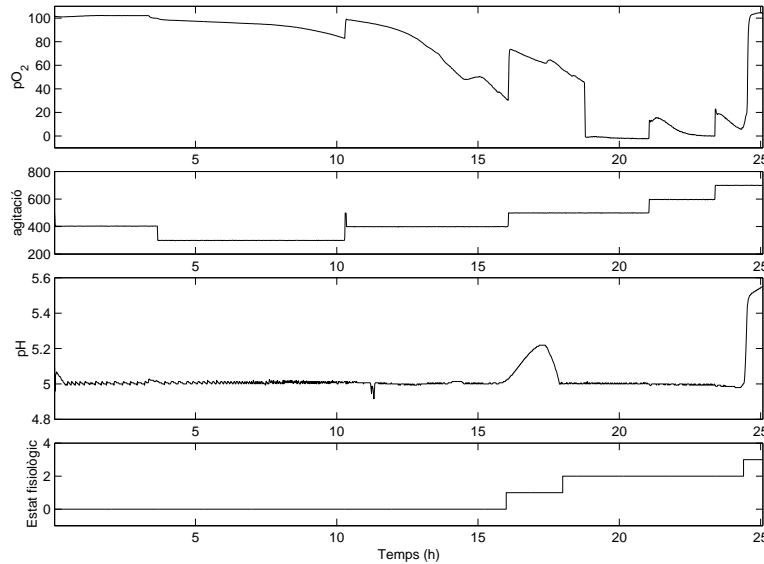


Figura 4.7: Senyals  $pO_2$ , *agitació* i  $pH$  corresponents al *batch E*.

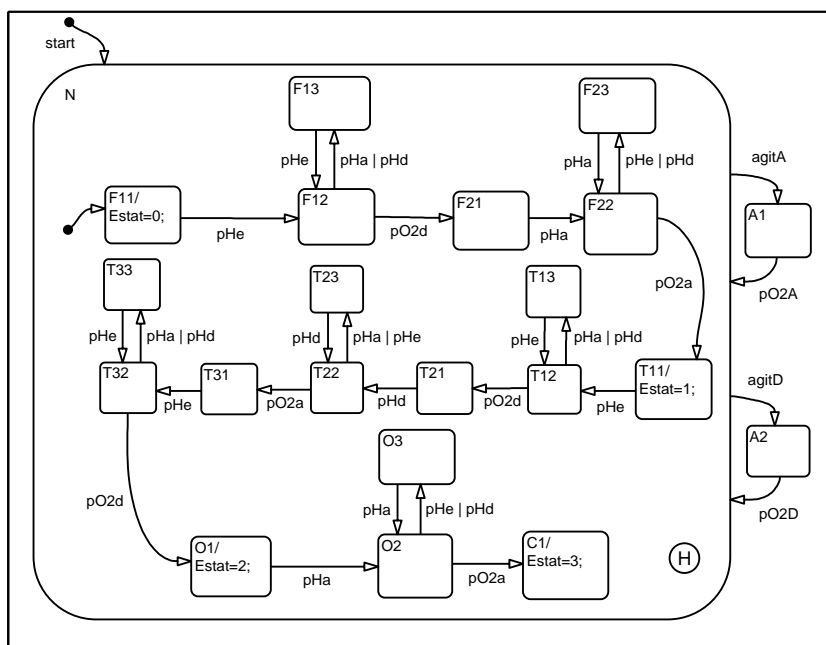
En aquest nou experiment, es fa palès la sensibilitat de la  $pO_2$  a un altre senyal: l'*agitació*. L'operador pot modificar a voluntat la intensitat d'*agitació* del medi. Tot canvi d'*agitació* repercuteix indirectament en la dinàmica de la  $pO_2$ . Aquest fet no impedeix que l'operador sigui capaç d'identificar l'estat fisiològic dels microorganismes. La fig. 4.7 també mostra l'estat fisiològic estimat per l'expert. Observi's la coincidència fortuïta de l'inici de la diòxia amb un canvi d'*agitació*.

En definitiva, es pot dissenyar un SIS que identifiqui l'estat fisiològic dels microorganismes a partir de l'anàlisi d'aquests tres senyals mesurats. Observant les dades corresponents als cinc experiments, es poden identificar les següents dinàmiques significatives:

- Durant l'etapa de fermentació la  $pO_2$  decreix i el  $pH$  es manté constant.
- Durant l'etapa de diòxia la  $pO_2$  presenta diverses oscil·lacions, coincidint amb un pic de certa durada en el  $pH$ .
- Durant l'etapa d'oxidació la  $pO_2$  decreix i el  $pH$  es manté altre cop constant.
- Al finalitzar el procediment *batch* i començar el continu  $pO_2$  i  $pH$  augmenten significativament.

- A tot augment (disminució) de l'agitació li correspon un augment (disminució) de la  $pO_2$ . És lògic pensar amb una relació causal directa entre el grau d'agitació del medi i el percentatge d'oxigen dissolt.

Tot plegat fa pensar que es pot obtenir un model a esdeveniments discrets d'un procediment *batch* a partir de l'observació de les tendències dels senyals analitzats. La fig. 4.8 mostra el model que s'ha implementat en STATEFLOW™. Aquest model reflecteix les dinàmiques significatives que s'acaben d'enumerar.



Printed 16-Sep-2001 11:52:25

Figura 4.8: Model a esdeveniments discrets del procediment *batch*.

Segons la metodologia proposada en el Capítol 3, aquest model correspon a un component complex (veure pàg. 116), ja que descriu el comportament d'un procés biològic a partir d'esdeveniments detectats en diversos senyals mesurats. És a dir,  $G_{PRO} = G_{COM}$ . En aquest model apareixen representats 22 estats. L'estat *N* és un *superestat* que representa el funcionament normal, en absència de canvis d'agitació. Aquest superestat s'estructura internament en 19 *subestats* que reflecteixen les diferents fases del procediment *batch*. Els conceptes de superestat i subestat són una de les particularitats dels Statecharts (veure l'Apèndix D).

Inicialment els microorganismes estan en la fase de fermentació. Aquesta fase s'ha modelat mitjançant els estats  $F11$ ,  $F12$ ,  $F13$ ,  $F21$ ,  $F22$  i  $F23$ . En aquesta fase s'espera observar simultàniament l'estabilització del  $pH$  i la disminució de la  $pO_2$ : mentre el  $pH$  està estable ( $pHe$ ), la  $pO_2$  està decreixent ( $pO2d$ ). La simultaniïtat s'expressa mitjançant el subdiagrama d'estats representat en la fig. 4.9. Segons aquest diagrama, la simultaniïtat vol dir observar la disminució de la  $pO_2$  just a continuació de l'estabilització del  $pH$ , descartant l'augment o decreixement del  $pH$  ( $pHa$  i  $pHd$ , respectivament)<sup>3</sup>.

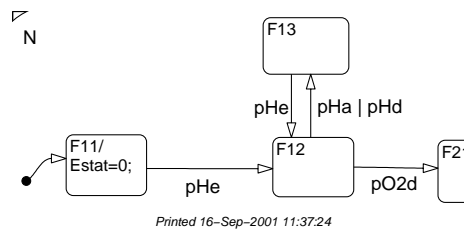


Figura 4.9: Submodel que expressa la simultaniïtat de l'estabilització del  $pH$  i del decreixement de la  $pO_2$ .

L'etapa de fermentació finalitza quan s'observa un augment simultani del  $pH$  ( $pHa$ ) i de la  $pO_2$  ( $pO2a$ ), donant pas a l'etapa de diòxia. Aquesta fase està representada pels 9 estats  $T11$ ,  $T12$ ,  $T13$ ,  $T21$ ,  $T22$ ,  $T23$ ,  $T31$ ,  $T32$  i  $T33$ . El  $pH$  s'estabilitza mentre que la  $pO_2$  oscil·la. Una de les primeres oscil·lacions s'espera detectar observant simultàniament l'estabilització del  $pH$  ( $pHe$ ) i la disminució de la  $pO_2$  ( $pO2d$ ). Aquesta dinàmica està representada pels estats  $T11$ ,  $T12$  i  $T13$ .

La darrera oscil·lació de la  $pO_2$  coincideix amb la disminució del  $pH$ . L'inici d'aquest darrer pic es detecta mitjançant els estats  $T21$ ,  $T22$  i  $T23$ . Amb ells, s'espera observar simultàniament la disminució del  $pH$  ( $pHd$ ) i l'augment de la  $pO_2$  ( $pO2a$ ).

La fase d'adaptació metabòlica acaba amb l'observació simultània de l'estabilització del  $pH$  ( $pHe$ ) i de la disminució de la  $pO_2$  ( $pO2d$ ), que indica la finalització de la darrera oscil·lació de la  $pO_2$ . Els estats  $T31$ ,  $T32$  i  $T33$  descriuen aquesta dinàmica.

Tot seguit, s'entra en la fase d'oxidació representada pels estats  $O1$ ,  $O2$  i  $O3$ . L'observació d'un augment simultani de  $pH$  ( $pHa$ ) i de  $pO_2$  ( $pO2a$ ) finalitza el procediment *batch*, i indica l'inici del procediment continu, representat per l'estat  $C1$ .

Els estats  $A1$  i  $A2$  serveixen per incorporar al model la dinàmica derivada de l'agitació. En qualsevol moment, durant el funcionament normal, és

<sup>3</sup>La notació  $pHa|pHd$  vol dir l'aconteixement d'un esdeveniment o de l'altre. Equivaldria a dues transicions de l'estat  $F12$  al  $F13$ , una per a cada esdeveniment.

possible observar un canvi en el grau d'agitació. L'estat  $A1$  serveix per expressar el fet que a continuació d'un augment de l'agitació ( $agitA$ ) s'ha d'esperar un augment de la  $pO_2$  ( $pO2A$ ). De forma anàloga, l'estat  $A2$  serveix per expressar el fet que a continuació d'una disminució de l'agitació ( $agitD$ ) s'ha d'esperar una disminució de la  $pO_2$  ( $pO2D$ ). La notació  $\textcircled{H}$  que apareix en la fig. 4.8 indica que després de transitar per l'estat  $A1$  o  $A2$  es retornarà al mateix subestat de  $N$  que s'havia abandonat. És una altra de les particularitats dels Statecharts (veure l'Apèndix D).

El model de la fig. 4.8 incorpora tot el coneixement heurístic necessari per identificar els diferents estats fisiològics. Aquest model expressa els diversos ordenaments esperats d'un conjunt de nou esdeveniments significatius:  $\Sigma_{PRO} = \{pO2A, pO2D, pO2a, pO2d, pHa, pHe, pHd, agitA, agitD\}$ . En el diagrama també apareix l'esdeveniment *start*. És un esdeveniment que s'ha introduït per forçar la inicialització del diagrama. Aquest esdeveniment es genera artificialment en SIMULINK<sup>®</sup> a l'inici de la simulació. D'aquesta manera, al començar s'activa l'estat  $N$  i, indirectament, l'estat  $F11$ .

Els nou esdeveniments significatius es detecten mitjançant un pla de detecció  $\mathfrak{D}_{BIO}$  constituït per tres camins de detecció de tendències, que analitzen cadascun dels tres senyals:  $\mathfrak{D}_{BIO} = \{\mathcal{E}D_{TpO_2}, \mathcal{E}D_{TpH}, \mathcal{E}D_{Tagitació}\}$ . L'anàlisi es realitza sobre els senyals mostrejats amb un període de 36 s. Cada camí de detecció s'ha configurat d'acord amb la metodologia presentada al Capítol 2.

La taula 4.1 recull els paràmetres de configuració del pla de detecció. Per cada camí de detecció s'han considerat únicament tres valors qualitius de tendència: 1 *creixent*, 0 *estable* i -1 *decreixent*. S'ha suposat que inicialment tots els senyals estan estables. D'altra banda, tots els desplaçaments de finestra s'han fixat al mínim, ja que l'equip informàtic en que s'ha implementat permet grans velocitats d'execució. També convé comentar que s'ha escollit interpolar esdeveniments, ja que interessa que les possibles discontinuïtats no emmascarin la detecció d'esdeveniments esperats pel model.

Pels esdeveniments s'ha establert la següent nomenclatura:  $pO2A = [e_{pO_2}]_0^1$ ,  $pO2D = [e_{pO_2}]_0^{-1}$ ,  $pO2a = [e_{pO_2}]_1^1$ ,  $pO2d = [e_{pO_2}]_{-1}^{-1}$ ,  $pHa = [e_{pH}]_1^1$ ,  $pHe = [e_{pH}]_0^0$ ,  $pHd = [e_{pH}]_{-1}^{-1}$ ,  $agitA = [e_{agitació}]_0^1$  i  $agitD = [e_{agitació}]_0^{-1}$ . Convé destacar que s'han considerat dues tipologies d'esdeveniments. Per expressar la seqüencialitat en la detecció d'esdeveniments s'han utilitzat esdeveniments derivats d'un canvi de magnitud qualitativa<sup>4</sup>. Per exemple, els encadenaments relacionats amb l'agitació (*i.e.*,  $agitA$  i  $pO2A$ , o  $agitD$  i  $pO2D$ ) expressen causalitat: un canvi d'agitació provoca un canvi en la concentració d'oxigen dissolt.

D'altra banda, per expressar la simultaniïtat s'han considerat esdeveniments derivats del manteniment d'una magnitud qualitativa<sup>5</sup>. Per exem-

---

<sup>4</sup>Són els esdeveniments identificats amb una etiqueta en que la darrera lletra és majúscula.

|                 | $\mathcal{E}\mathcal{D}_{TpO_2}$                                    | $\mathcal{E}\mathcal{D}_{TpH}$                                      | $\mathcal{E}\mathcal{D}_{Tagitació}$                                |
|-----------------|---|---|---|
| $\mathcal{E}_M$ | $\{-1, 0, 1\}$  | $\{-1, 0, 1\}$  | $\{-1, 0, 1\}$  |
| $\mathcal{L}_M$ | $\{-1, 1\}$   | $\{-0.2, 0.2\}$   | $\{-10, 10\}$   |
| $a_P$           | 50  | 50  | 50  |
| $d_P$           | 1   | 1   | 1   |
| $a_M$           | 30  | 20  | 20  |
| $d_M$           | 1   | 1   | 1   |
| $\mathcal{M}_M$ | $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ |
| $\bar{v}_M$     | 0   | 0   | 0   |
| <i>interpol</i> | <i>cert</i>   | <i>cert</i>   | <i>cert</i>   |

Taula 4.1: Configuració del pla de detecció per al procés biotecnològic.

ple, *pHe* expressa *mentre el pH està estabilitzat*. Un exemple d'aplicació d'aquest tipus d'esdeveniments s'ha vist a la fig. 4.9.

La fig. 4.10 mostra el diagrama de SIMULINK<sup>®</sup> que implementa el SIS per al procés biotecnològic. El SIS analitza els senyals mesurats mitjançant els tres detectors de tendències. A continuació, els esdeveniments detectats són processats pel supervisor, que implementa el model a esdeveniments discrets de la fig. 4.8. El bloc *Start* genera un senyal que provoca l'esdeveniment d'inicialització. D'altra banda, la variable de sortida del bloc de STATEFLOW<sup>™</sup> *Estat* proporciona l'estimació de l'estat fisiològic.

El disseny del SIS s'ha realitzat de forma iterativa, passant de la descripció del model a la configuració dels camins de detecció, i a la inversa. D'aquesta forma s'ha aconseguit refinar el SIS fins a proporcionar resultats satisfactoris pels cinc experiments, per una mateixa configuració del SIS. Les figs. 4.11 i 4.12 mostren els resultats obtinguts amb el SIS per als *batches C* i *E*, respectivament. En ambdós casos s'aconsegueix estimar l'estat fisiològic dels microorganismes de forma molt similar a com s'havia especificat en les figs. 4.6 i 4.7.

Observi's el gran número d'esdeveniments que es detecten. Les franges negres indiquen la detecció continuada d'esdeveniments de permanència de magnituds qualitatives. Per exemple, mentre el *pH* està estable, es detecta contínuament l'esdeveniment *pHe*.

No tots els esdeveniments que es detecten són reconeguts explícitament pel model de la fig. 4.8. Aquest model només expressa els esdeveniments que espera que provoquin canvis d'estat, mitjançant transicions. Per exemple, durant la fase d'oxidació el supervisor es manté en l'estat *O1*, esperant

---

<sup>5</sup>Són els esdeveniments identificats amb una etiqueta en que la darrera lletra és minúscula.



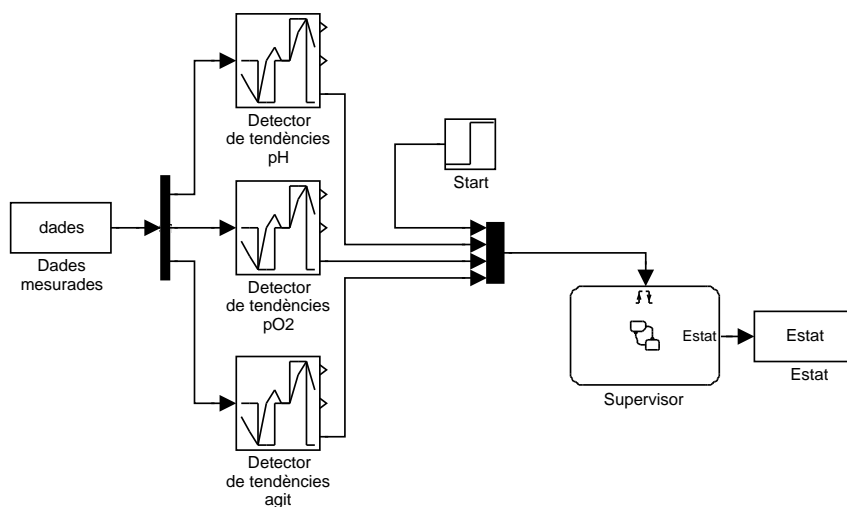
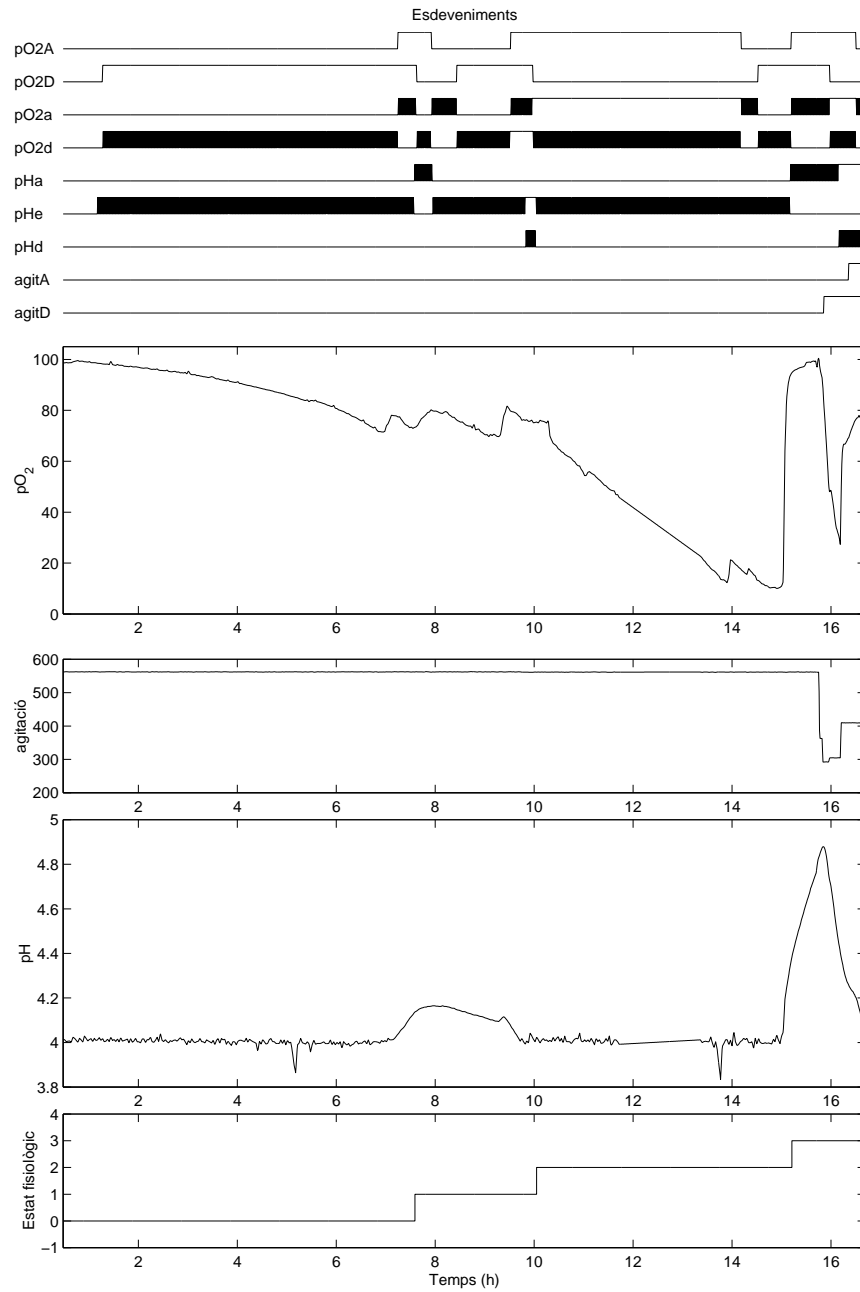


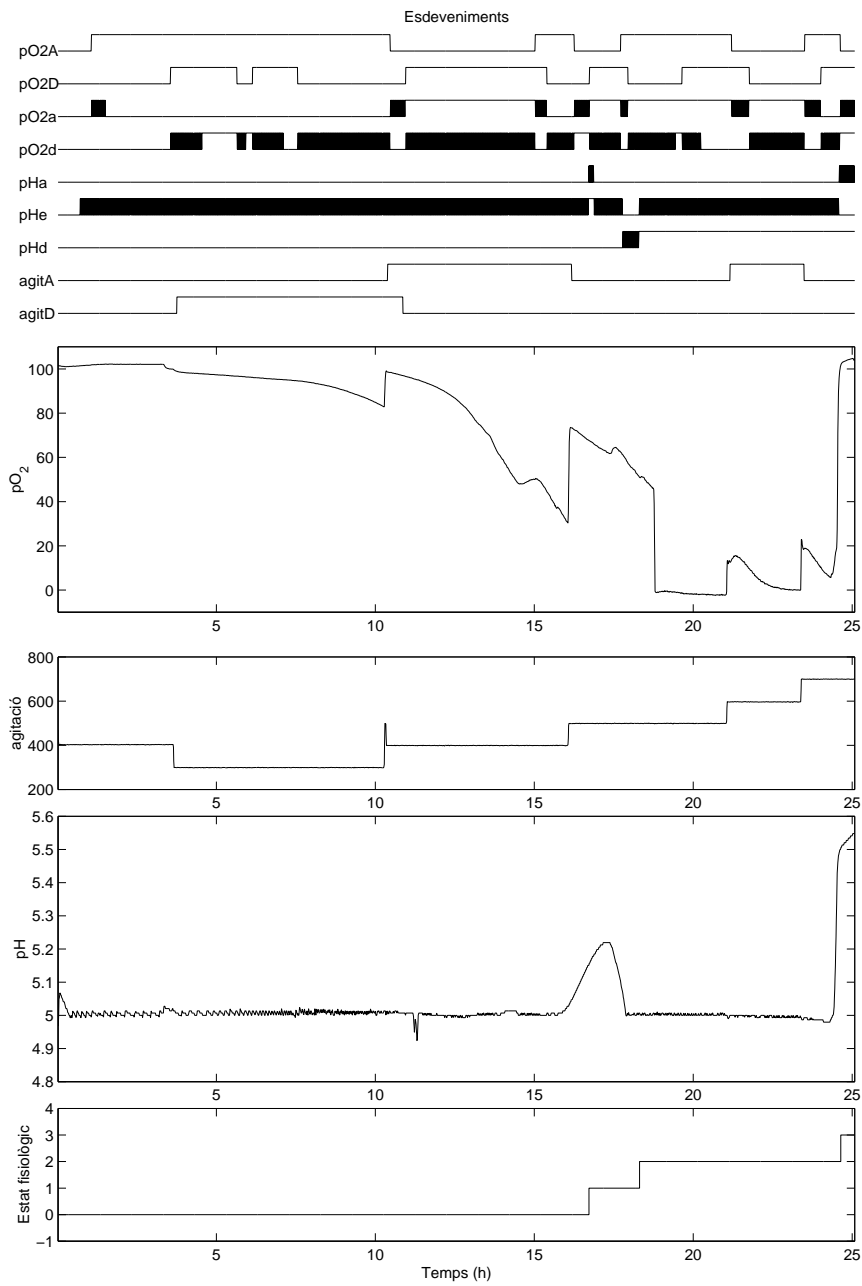
Figura 4.10: SIS dissenyat per al procés biotecnològic.

detectar l'esdeveniment  $pHa$ , el  $agitA$  o el  $agitD$ . No obstant, a través dels resultats, es pot observar com durant aquesta espera es detecta repetidament l'esdeveniment  $pHe$ . En canvi, segons el model en l'estat  $O1$  no s'espera aquest esdeveniment. Aparentment, aquest fet pot semblar una contradicció. No obstant, té la seva explicació: davant una situació com la plantejada, el model de STATEFLOW<sup>TM</sup> ignorarà tot esdeveniment que no figuri associat a una transició de sortida i l'estat es mantindrà inalterat. De fet, aquest és el comportament que ens interessa. Segons l'expert, durant l'etapa d'oxidació el  $pH$  es manté estable. En aquesta situació, l'observació d'aquest esdeveniment no hauria d'alterar l'estat del supervisor.

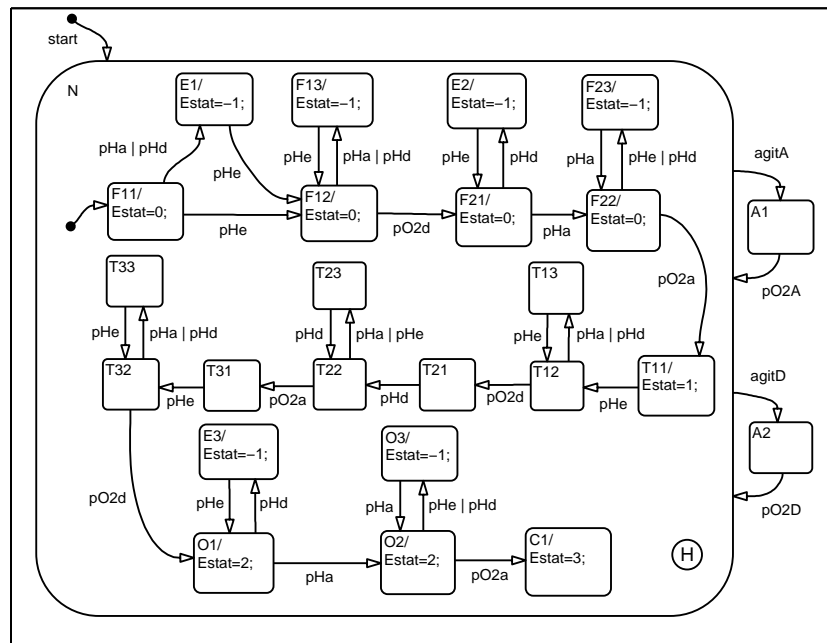
Alternativament, s'hauria pogut incorporar una transició reflexiva a l'estat  $O1$  associada a l'esdeveniment  $pHe$ . Llavors, la detecció de l'esdeveniment  $pHe$  provocaria una transició, però l'estat destí seguiria essent el mateix  $O1$ . És a dir, afegir transicions reflexives té el mateix efecte que no afegir-les. En aquestes circumstàncies, a fi de simplificar la complexitat del diagrama de STATEFLOW<sup>TM</sup>, resulta convenient no posar cap transició reflexiva.

Els camins de detecció s'han dissenyat amb l'objectiu de detectar els esdeveniments significatius allí on el model especifica, tenint en compte les dades dels cinc experiments disponibles. Això no impedeix que durant un experiment *batch* es puguin detectar també esdeveniments en fases no previstes pel model. Per exemple, s'espera que el  $pH$  es mantingui estable durant les fases de fermentació i oxidació. Però, què passa si en l'estat  $O1$  s'observa una disminució del  $pH$ ? Tal com s'ha comentat abans, STATEFLOW<sup>TM</sup> ignorarà aquest esdeveniment, sense canviar d'estat. Això vol dir que tot

Figura 4.11: Aplicació del SIS al *batch C*.

Figura 4.12: Aplicació del SIS al *batch E*.

comportament no expressat en el diagrama és ignorat. Si interessa poder detectar la manifestació de certs comportaments no esperats, convindrà que apareixin explícitament en el model, conduint a algun estat d'alarma o de fallada, que permeti assenyalar-ho. En aquest sentit, la fig. 4.13 mostra una variació del model de la fig. 4.8. L'objectiu d'aquest nou model continua essent determinar l'estat fisiològic dels microorganismes. No obstant, ara també es vol poder identificar tot comportament que derivi del fet que el  $pH$  no segueixi una trajectòria estable durant la fase de fermentació i d'oxidació. El model s'ha dissenyat de forma que un cop detectada la dinàmica no esperada, és possible recuperar-se, i continuar vigilant el procés.



Printed 16-Sep-2001 17:06:58

Figura 4.13: Model amb capacitat per identificar cert comportament no desitjat.

De fet, en la versió anterior del model ja existien diversos estats que representaven comportament no esperat. No obstant no s'utilitzaven per assenyalar-ho. Ara, s'han utilitzat els estats  $F13$ ,  $F23$  i  $O3$  per indicar dinàmiques no esperades. El model assenyalava la dinàmica inesperada assignant el valor  $-1$  a la variable  $Estat$ . Per exemple, se sap que l'etapa d'oxidació finalitza quan  $pH$  i  $pO_2$  augmenten simultàniament. Si per qualsevol cosa, el  $pH$  manifesta una oscil·lació abans, l'estat  $O3$  permet assenyalar

aquesta dinàmica com a no esperada. De manera similar, els estats  $F13$  i  $F23$  permeten detectar oscil·lacions del  $pH$  durant l'etapa de fermentació.

D'altra banda, ha fet falta incorporar 3 nous estats (*i.e.*,  $E1$ ,  $E2$  i  $E3$ ) per poder detectar oscil·lacions en el  $pH$  a partir dels estats que mancava considerar (*i.e.*,  $F11$ ,  $F21$  i  $O1$ ). Per exemple, l'estat  $E1$  permet identificar oscil·lacions en el  $pH$  just a l'inici del *batch* (*i.e.*, a partir de l'estat  $F11$ ).

La fig. 4.14 mostra els resultats obtinguts amb el nou supervisor per al *batch*  $B$ . Observi's com l'estat fisiològic és identificat satisfactòriament, a partir de les dinàmiques esperades. A la vegada, el SIS és capaç d'identificar certs comportaments no desitjats derivats del  $pH$ : el pic a l'inici del *batch*, les oscil·lacions durant la fase de fermentació i les oscil·lacions durant la fase d'oxidació.

L'Apèndix B mostra i comenta els resultats obtinguts amb el nou model per als *batches* restants,  $A$  i  $D$ <sup>6</sup>.

En definitiva, s'ha pogut dissenyar un SIS que permet identificar l'estat fisiològic d'un procés biotecnològic, així com assenyalar certs comportaments inesperats.

## 4.3 Supervisió d'una màquina eina

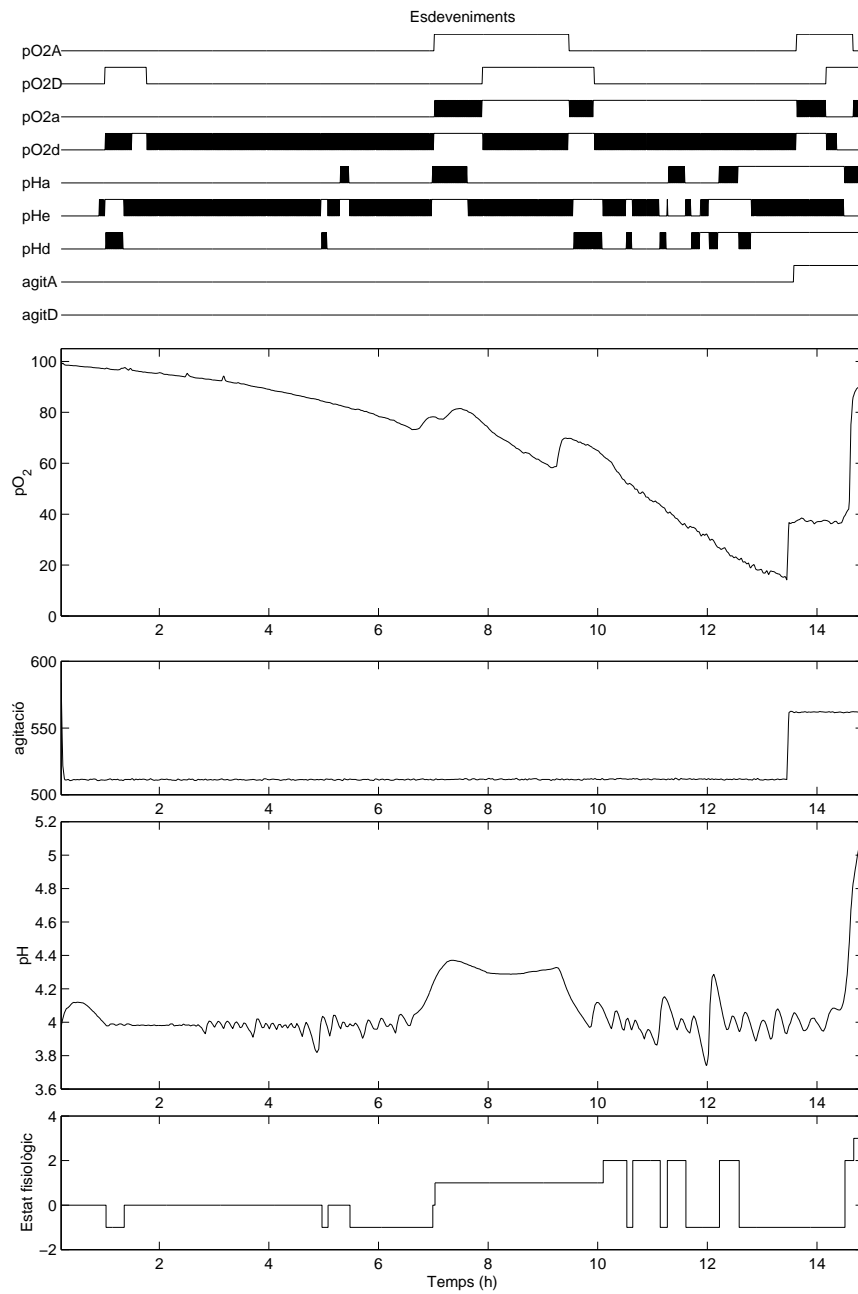
### 4.3.1 Descripció del procés

Les exigències tecnico-econòmiques d'avui en dia imposen la necessitat de fabricar un gran número de productes iguals entre si i de gran qualitat. L'ús de màquines eina [89] ha permès reproduir un mateix cicle de transformació en idèntiques peces en brut. Així, la producció en sèrie s'ha servit de les màquines eina per fabricar un gran volum de peces de qualitat uniforme, de forma segura i contínua.

L'elaboració manual de peces ha deixat pas a la fabricació automatitzada i els operadors han assumit la tasca de vigilar i ajustar les màquines eina. Els sistemes de control numèric s'encarreguen de seqüenciar correctament els diversos moviments de les plataformes, eines i altres elements que constitueixen la màquina. Tots els moviments s'executen amb precisió i constància. No obstant, aquests sistemes són incapaços de detectar la presència de defectes com la ruptura o el desgast de l'eina. Arran de l'aparició d'anomalies en el procés, l'operador és l'encarregat d'intentar prevenir l'aturada de la màquina, mitjançant un programa de manteniment predictiu. No cal dir que qualsevol aturada en el procés productiu és del tot indesitjable, ja que pot comportar importants pèrdues econòmiques. Interessa, doncs, garantir a tot preu la prevenció de fallades en el procés i, en cas de produir-se, és molt important poder detectar-les a temps, i saber posar-hi remei. Per tant, un dels objectius més perseguit pels sistemes de supervisió és la capacitat

---

<sup>6</sup>Els resultats per als *batches*  $C$  i  $E$  no varien amb aquest nou supervisor.

Figura 4.14: Aplicació del SIS al *batch B*.

d'automatitzar la detecció i diagnòstic de fallades, així com d'acomodar el control a aquestes.

Atenent les necessitats que s'acaben d'exposar, es dissenyarà un SIS per a un centre de mecanitzat de peces metàl·liques amb arrencament de llimalla. En concret, es vol supervisar una fresadora ubicada en el Laboratori d'Enginyeria de Producció de l'Ecole National d'Ingénieurs (ENI) a Tarbes (veure fig. 4.15).

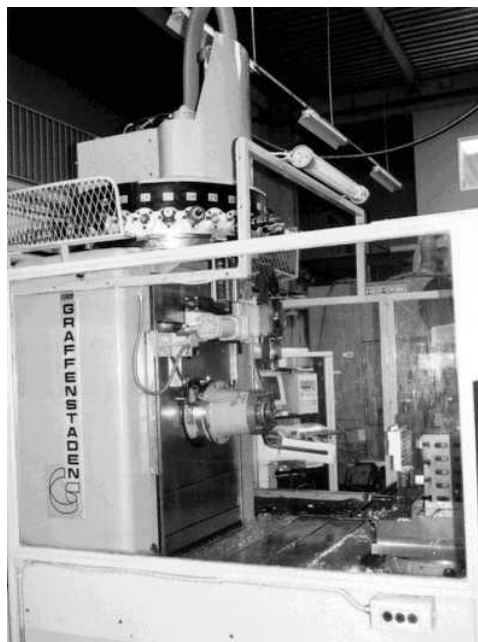


Figura 4.15: Una fresadora horitzontal ubicada a l'ENIT de Tarbes.

L'element principal d'aquesta màquina és la fresa, un eina tallant proveïda de dents afilades disposades simètricament al voltant d'un eix (veure fig. 4.16). La màquina imprimeix a l'eina un moviment giratori uniforme, i a la peça un moviment de translació mitjançant una plataforma. L'eina es manté en una posició fixa i, governant convenientment la plataforma, es logra posar en contacte la peça amb l'eina. D'aquesta manera, s'aconsegueix arrencar material, alterant la forma i dimensió de la peça bruta.

Diversos equips de recerca arreu del món han proposat algorismes per a la vigilància de màquines eina[21][35][46][72]. La majoria tenen per objectiu detectar la ruptura o el desgast de l'eina. Normalment, es basen en l'anàlisi de senyals provinents de sensors de força, de sensors acústics i d'acceleròmetres, per a la mesura de vibracions. Alguns apliquen tècniques de fusió de sensors i classificació amb xarxes neuronals[46][72]. Uns altres utilitzen tècniques que s'han aplicat amb èxit en el reconeixement de la veu, com els models ocults de Markov[21].



Figura 4.16: Una fresa de tall frontal.

El SIS permetrà a l'operador prevenir fallades en la màquina eina, derivades de la manca de lubricant. En particular, es pretén que el SIS sigui capaç de detectar l'esdeveniment *aturada de lubricació* de forma automatitzada.

Per aconseguir els més alts valors de producció, una durada més prolongada de l'eina i millors acabats és, en general, aconsellable i, en molts casos, indispensable utilitzar líquids lubricants i refrigerants sobre les eines de tall i les peces que es treballen [79]. Aquests líquids s'utilitzen principalment per eliminar de la peça la calor acumulada, mantenir baixa la temperatura de l'eina, reduir el desgast per fregament, produir un bon acabat superficial, evitar l'oxidació de les peces, i trencar i arrossegar la llimalla. És comú utilitzar emulsions d'olis minerals en les operacions de fresatge.

La manca de lubricant o simplement el minvament de les seves qualitats ideals pot originar un desgast accelerat de l'eina, un mecanitzat defectuós o, fins i tot, un malmetement de la fresadora. És molt important poder detectar un fet com aquest d'una forma precoç.

### 4.3.2 Disseny del SIS

La fresadora de Tarbes té instal·lat un sensor piezoelèctric de l'empresa suïssa Kistler a la base de la peça a mecanitzar. Aquest sensor permet obtenir una mesura de l'esforç de tall, proporcionant les tres components de força  $F_x$ ,  $F_y$  i  $F_z$ . Es disposa de les dades de força de tres operacions de mecanitzat. Anomenem aquestes operacions *assaig A*, *B* i *C*. Els paràmetres del fresat



| Assaig   |            |                      |
|----------|------------|----------------------|
| A, B i C |            |                      |
| $N$      | 800 rpm    | Velocitat de rotació |
| $D$      | 63 mm      | Diàmetre de la fresa |
| $V$      | 800 mm/min | Velocitat d'avang    |
| $d$      | 35 mm      | Amplada del tall     |
| $aa$     | 2 mm       | Profunditat del tall |
| $n$      | 5          | Número de dents      |

Taula 4.2: Paràmetres del fresat.

són els de la taula 4.2, i s'il·lustren a la fig. 4.17.

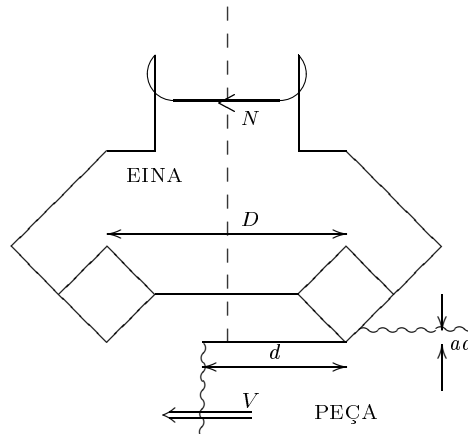


Figura 4.17: Paràmetres del fresat

L'assaig *A* correspon a un mecanitzat normal. La fig. 4.18 mostra la típica evolució temporal dels tres senyals de força per aquest assaig. El període mostreig dels senyals és 0.001 s.

El SIS no es dissenyarà a partir de l'anàlisi individual d'aquestes tres components de força, sinó que es fonamentarà en el processament de la força resultant  $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$ . Es considera que aquesta resultant fusiona la informació continguda en les tres components individuals. La fig. 4.18 també mostra la força resultant corresponent a l'assaig *A*.

El senyal de força admet ésser analitzat a dues escales o nivells: macrosòpic i microscòpic. A nivell macrosòpic, es fàcil distingir les diverses etapes de mecanitzat. La fig. 4.18 també mostra aquestes etapes. Inicialment la plataforma avança en el sentit *X*. L'eina treballa en buit, fins que als 3 s entra en contacte amb la peça. S'anomena aquesta fase *en buit*. A

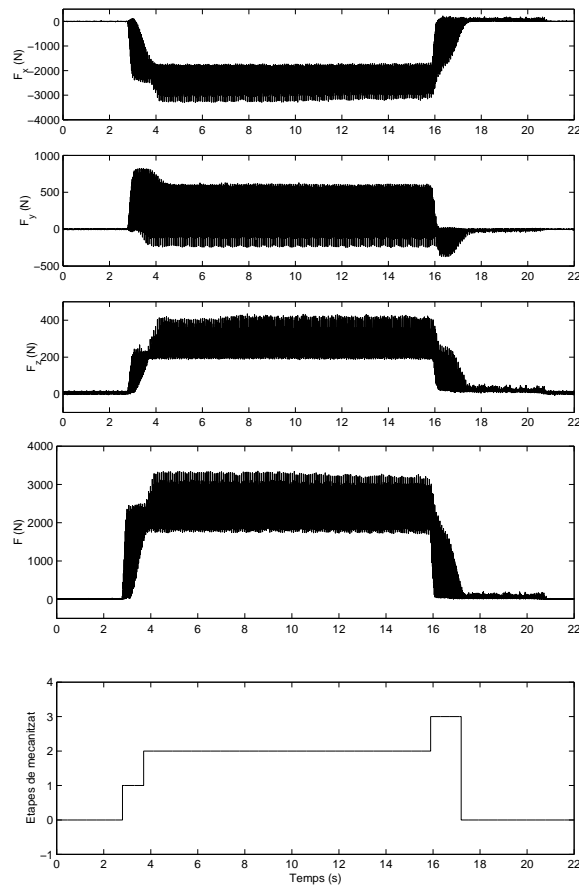


Figura 4.18: Senyals  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$   $F$  i les etapes de mecanitzat corresponents a l'assaig A: 0 – en buit, 1 – entrada, 2 – mecanitzat i 3 – sortida.

continuació, l'eina va penetrant progressivament en la peça. És la fase *entrada*. Entre els 4 i els 16 s es desenvolupa la fase *mecanitzat*. És l'etapa principal, en que la fresa treballa a ple rendiment. Un cop recorreguda tota la peça en el sentit  $X$ , l'eina la deixa. És l'etapa *sortida*. Finalment als 17 s es retorna a la fase *en buit*.

A nivell microscòpic, es poden apreciar grans oscil·lacions resultants de la superposició de diverses components freqüencials significatives. D'una banda, la freqüència de rotació de l'eina  $800 \text{ rpm/min} = 13.33 \text{ Hz}$ , i freqüències múltiples. D'altra, la freqüència d'atac de les 5 dents de l'eina  $13.33 \text{ Hz} \times 5 \text{ dents} = 66.67 \text{ Hz}$ , i freqüències múltiples. La fig. 4.19 mostra un detall de la resultant  $F$  i el seu espectre, durant l'etapa de mecanitzat. En l'espectre s'ha descartat la component contínua.

L'objectiu principal del SIS és identificar l'esdeveniment *aturada de lubricació*. En els assatjos *B* i *C* s'origina una manca de lubricant durant

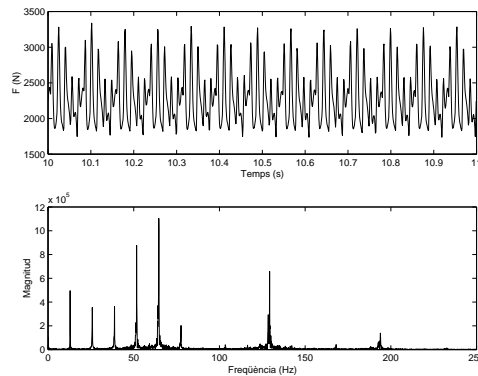


Figura 4.19: Zoom del senyal  $F$  i el seu espectre significatiu, corresponent a l'assaig  $A$ .

un cert interval de temps. La fig. 4.20 mostra les dades brutes de l'assaig  $B$ . Difícilment es pot apreciar alguna dinàmica que delati el defecte de lubricant.

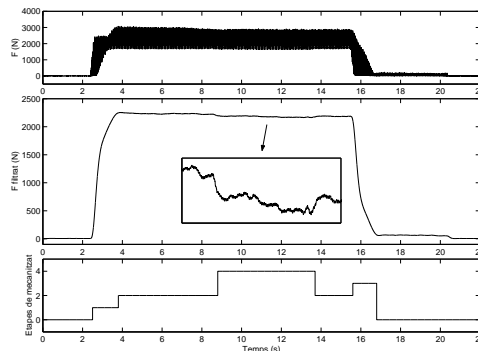


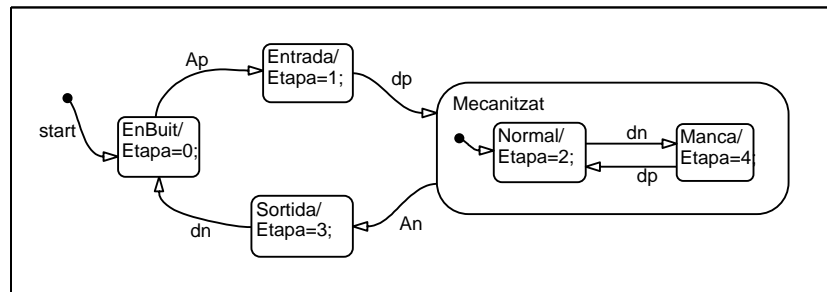
Figura 4.20: Senyal  $F$  en brut i filtrat, i les etapes de mecanitzat corresponents a l'assaig  $B$ : 0 – en buit, 1 – entrada, 2 – mecanitzat, 3 – sortida i 4 – manca de lubricant.

La fig. 4.20 també mostra el senyal  $F$  un cop se li ha aplicat un filtrat passa-baix a 2 Hz, amb un detall de l'interval durant el que es produeix la manca de lubricació. S'ha escollit una freqüència de tall que elimini les components freqüencials identificades en la fig. 4.19. Durant l'etapa de mecanitzat, el senyal filtrat permet descobrir una lleugera disminució d'esforç als 9 s. Aquesta dinàmica es pot relacionar amb l'esdeveniment *aturada de lubricació*. Més endavant, també és possible detectar-hi un lleuger augment de l'esforç als 14 s, augment que es pot relacionar a l'esdeveniment *represa de lubricació*. La fig. 4.20 també mostra les etapes de mecanitzat,

incorporant la nova etapa *manca de lubricant*.

En definitiva, l'anàlisi macroscòpic de l'esforç resultant filtrat permetrà no només identificar l'esdeveniment cercat sinó també determinar les etapes de mecanitzat.

Observant la resultant  $F$  filtrada corresponent als tres assaigs, s'arriba a la conclusió que les tendències de  $F$  són significatives. Partint d'aquest fet, s'ha implementat un model en STATEFLOW<sup>TM</sup> en que els estats identifiquen les diverses etapes de mecanitzat i les transicions estan relacionades amb les tendències del senyal  $F$  filtrat. Aquest model es mostra en la fig. 4.21.



Printed 06-Dec-2001 12:16:50

Figura 4.21: Model a esdeveniments discrets del procediment de fresat.

Segons la metodologia proposada en el Capítol 3, aquest model correspon a un únic component complex (veure pàg. 116), que descriu un procediment de fresat a partir de les tendències del senyal de força filtrat.

En aquest model apareixen representats sis estats. El fresat s'inicia amb l'estat *EnBuit*. En el moment en que la fresa entra en contacte amb la peça es produeix un gran augment de  $F$  ( $Ap$ ). S'entra llavors en l'estat *Entrada*, i s'hi permaneceix fins detectar una nova estabilització de la força ( $dp$ ).

Tot seguit s'entra en l'estat *Mecanitzat*, que és un *superestat* que representa l'etapa principal de mecanitzat. Aquest superestat s'estructura internament en dos *subestats* que concreten les condicions de mecanitzat, discriminant entre el mecanitzat normal (*Normal*) i el mecanitzat amb manca de lubricant (*Manca*). L'etapa de mecanitzat sempre s'inicia amb l'estat *Normal*. Una petita disminució i posterior estabilització de l'esforç ( $dn$ ) indica un defecte de lubricant. D'altra banda, un petit augment i posterior estabilització de l'esforç ( $dp$ ) assenjala la recuperació de lubricant. Els conceptes de superestat i subestat són una de les particularitats dels Statecharts (veure l'Apèndix D).

En qualsevol moment pot finalitzar el fresat. Una gran disminució de l'esforç ( $An$ ) porta a l'estat *Sortida*. En aquesta etapa, la fresa deixa pro-

|                 | $\mathcal{C}\mathcal{D}_{TF}$   |
|-----------------|---|
| $\mathcal{E}_M$ | $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$   |
| $\mathcal{L}_M$ | $\{-250, -60, 60, 250\}$  |
| $a_P$           | 250   |
| $d_P$           | 1   |
| $a_M$           | 80  |
| $d_M$           | 1   |
| $\mathcal{M}_M$ | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ |
| $\bar{v}_M$     | 0   |
| <i>interpol</i> | <i>cert</i>   |

Taula 4.3: Configuració del pla de detecció per al procés de mecanitzat.

gressivament d'estar en contacte amb la peça, i l'abandona definitivament quan l'esforç s'estabilitza ( $dn$ ), donant de nou pas a l'estat *EnBuit*. D'aquesta manera, aquest model permet reproduir cíclicament el procés de fresat.

El model de la fig. 4.21 incorpora tot el coneixement heurístic necessari per identificar les diferents etapes del procés de fresat. Aquest model expressa els diversos ordenaments esperats d'un conjunt de quatre esdeveniments significatius:  $\Sigma_{PRO} = \{Ap, dp, dn, An\}$ . En el diagrama també apareix l'esdeveniment *start*. Igual que en el diagrama del procés biotecnològic (veure fig. 4.8), s'ha introduït aquest esdeveniment per forçar la inicialització del diagrama. Aquest esdeveniment es genera artificialment en SIMULINK<sup>®</sup> a l'inici de la simulació. D'aquesta manera, al començar s'activa l'estat *EnBuit*.

Els quatre esdeveniments significatius es detecten mitjançant un pla de detecció  $\mathfrak{P}\mathcal{D}_{MEC}$  constituït per un sol camí de detecció de tendències aplicat sobre el senyal  $F$  filtrat,  $\mathfrak{P}\mathcal{D}_{MEC} = \{\mathcal{C}\mathcal{D}_{TF}\}$ . L'anàlisi es realitza sobre el senyal mostrejat amb un període de 0.001 s. Aquest camí de detecció s'ha configurat d'acord amb la metodologia presentada al Capítol 2.

La taula 4.3 recull els paràmetres de configuració del pla de detecció. S'han considerat cinc valors qualitius de tendència: 2 *molt creixent*, 1 *creixent*, 0 *estable*, -1 *decreixent* i -2 *molt decreixent*. S'ha suposat que inicialment el senyal està estable. D'altra banda, el desplaçament de finestra s'ha fixat al mínim, ja que l'equip informàtic en que s'ha implementat permet grans velocitats d'execució. També convé comentar que s'ha escollit interpolar esdeveniments, ja que interessa que les possibles discontinuïtats

no emmascarin la detecció d'esdeveniments esperats pel model.

Pels esdeveniments, s'ha establert la següent nomenclatura:  $Ap = [e_F]_1^2$ ,  $dp = [e_F]_1^0$ ,  $dn = [e_F]_{-1}^0$  i  $An = [e_F]_{-1}^{-2}$ . Tots aquests esdeveniments s'associen a canvis de magnitud qualitativa i serveixen per expressar la causalitat en el model.

La fig. 4.22 mostra el diagrama de SIMULINK<sup>®</sup> que implementa el SIS per al procés de mecanitzat. Inicialment el senyal  $F$  és processat amb un filtre digital passa-baix de Butterworth d'ordre 2 amb una freqüència de tall ubicada als 2 Hz. A continuació, el SIS analitza el senyal mesurat mitjançant un detector de tendències. Tot seguit, els esdeveniments detectats són processats pel supervisor, que implementa el model a esdeveniments discrets de la fig. 4.21. El bloc *Start* genera un senyal que provoca l'esdeveniment d'inicialització. D'altra banda, la variable de sortida del bloc de STATEFLOW<sup>™</sup> *Etapa* proporciona l'estimació de l'etapa del procés de fresat.

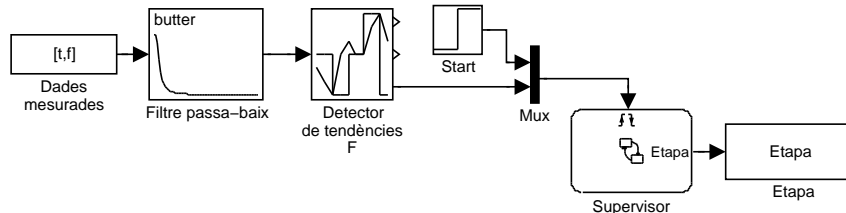


Figura 4.22: SIS dissenyat per al procés de fresat.

El disseny del SIS s'ha realitzat de forma iterativa, passant de la descripció del model a la configuració del camí de detecció, i a la inversa. D'aquesta forma, s'ha aconseguit refinar el SIS fins a proporcionar resultats satisfactoris pels tres assaigs, per a una mateixa configuració del SIS. Les figs. 4.23 i 4.24 mostren els resultats obtinguts amb el SIS dissenyat per als assaigs *A* i *B*, respectivament. En ambdós casos s'aconsegueix estimar l'etapa de mecanitzat de forma molt similar a com s'havia especificat en les figs. 4.18 i 4.20.

L'Apèndix C mostra i comenta els resultats obtinguts per l'assaig *C*.

Igual que passava amb el procés biotecnològic, el model de la fig. 4.21 només reflecteix la dinàmica esperada. Qualsevol seqüència d'esdeveniments inesperada és ignorada. Per exemple, durant l'etapa *EnBuit* el supervisor només espera detectar l'esdeveniment  $Ap$ . No obstant, a través dels resultats, es pot observar com durant aquesta etapa també es produeix l'esdeveniment  $dn$ . Tots aquests esdeveniments no esperats són ignorats. Si interessés poder detectar la manifestació de certs comportaments no esperats, convindria que apareguessin explícitament en el model, conduint a algun estat d'alarma o de fallada, que permetés assenyalar-ho. En aquest sentit la fig. 4.25 mostra una variació del model de la fig. 4.21. L'objectiu d'aquest nou

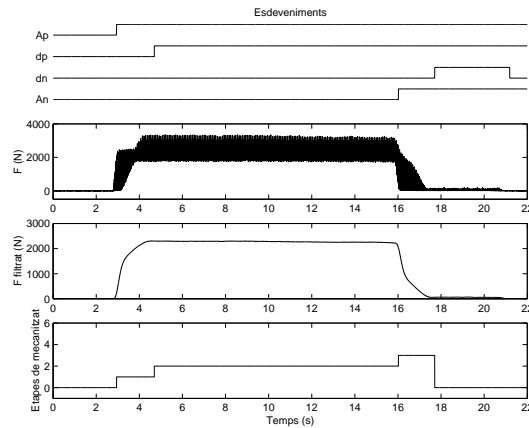


Figura 4.23: Aplicació del SIS a l'assaig A.

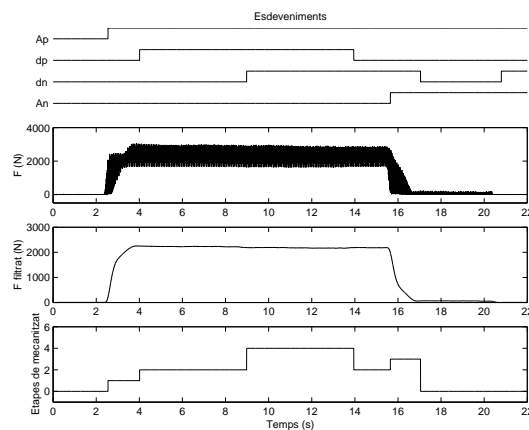


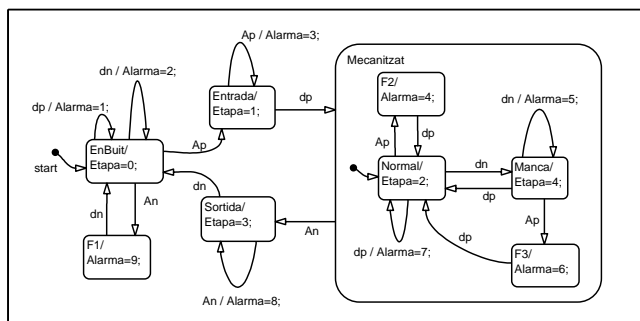
Figura 4.24: Aplicació del SIS a l'assaig B.

model continua essent detectar la manca de lubricant. No obstant, ara també es vol poder identificar tot comportament no esperat que divergeixi de l'expressat a través del model de la fig. 4.21. El nou model s'ha dissenyat de forma que continua permetent identificar les etapes del procés de mecanitzat. Però ara, a més, permet identificar comportament inesperat.

El nou supervisor permet identificar fins a 9 situacions inesperades, que són assenyalades per mitjà de la variable *Alarma*. S'han incorporat tres estats d'alarma  $F1$ ,  $F2$  i  $F3$ , i 6 transicions reflexives d'alarma.

El model s'ha obtingut de la següent manera. Primer, s'ha cercat el generador  $G_{MEC}$  que equival al model en STATEFLOW<sup>TM</sup> de la fig. 4.21. Aquest generador es mostra en la fig. 4.26(a).

A l'hora de dissenyar el supervisor pel procés biotecnològic, s'ha ar-



Printed 06-Dec-2001 13:27:48

Figura 4.25: Model amb capacitat per identificar cert comportament inesperat.

gumentat que els esdeveniments no esperats es podien suposar associats a transicions reflexives, ja que no provocaven cap canvi d'estat. Per aquest motiu, aquest generador incorpora transicions reflexives per a tots els esdeveniments que no estiguin ja associats a alguna transició de sortida que condueixi a algun estat destí diferent de l'estat origen.

D'altra banda, observi's l'equivalència que s'ha trobat per al superestat *Mecanitzat*. L'arribada a aquest estat sempre condueix a l'estat *Normal*. En canvi, la sortida d'aquest estat pot produir-se des de l'estat *Normal* o *Manca*. Aquesta equivalència es deu a la notació dels Statecharts (veure l'Apèndix D).

A continuació, s'ha cercat el model del sensor de força, ja que expressarà les seqüències que són físicament possibles. El generador  $G_{FOR}$  es mostra en la fig. 4.26(b).

Ambdós generadors,  $G_{MEC}$  i  $G_{FOR}$ , es poden considerar com a models de dos components. El primer és un component complex que expressa les etapes del procés de mecanitzat i el segon és un component simple que modela el sensor de força. La composició paral·lela d'ambdós generadors permet obtenir un nou model de la planta  $G_{PLA}$ . Aquest model es mostra a la fig. 4.27.

Precisament, aquest generador  $G_{PLA}$  resulta ser l'equivalent del model en STATEFLOW™ de la fig. 4.25. Als tres estats representats amb un quadrat només s'hi pot arribar amb l'aparició d'algun esdeveniment inesperat. En el diagrama de STATEFLOW™, els tres estats equivalents  $F1$ ,  $F2$  i  $F3$  ho assenyalen, mitjançant la variable *Alarma*.

D'altra banda, totes les transicions reflexives estan associades a esdeveniments inesperats. Per això en el diagrama de STATEFLOW™ s'utilitzen aquestes transicions per assenyalen-ho mitjançant la variable *Alarma*.



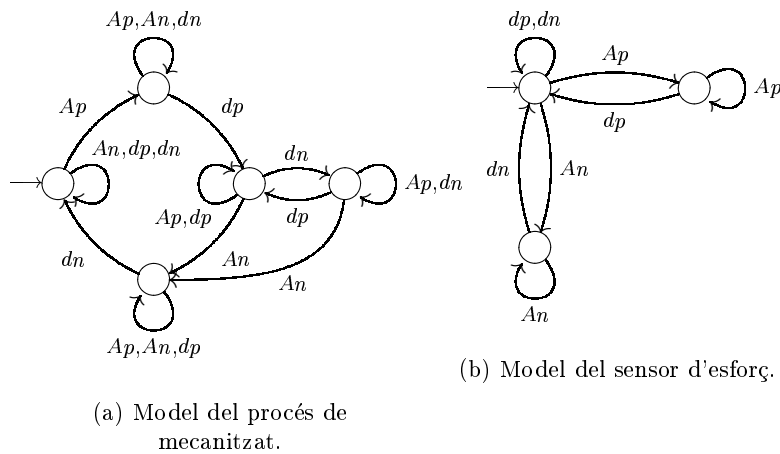


Figura 4.26: Generadors dels components pel procés de mecanitzat.

Únicament les transicions reflexives dels estats  $F1$ ,  $F2$  i  $F3$  no apareixen ja que no condueixen a un estat d'alarma nou.

Finalment, observi's com l'utilització del superestat *Mecanitzat* ha permès simplificar lleugerament el diagrama equivalent en STATEFLOW<sup>TM</sup>. Aquest fet justifica la utilització dels Statecharts per economitza estats i transicions a l'hora de representar diagrames d'estats i transicions.

La fig. 4.28 mostra el resultat que proporciona el nou SIS (*i.e.*, el supervisor de la fig. 4.25) per l'assaig  $B$ .

Observi's com el SIS és capaç de continuar indicant l'etapa de mecanitzat, juntament amb una assenyalament de la dinàmica inesperada que es produeix un cop superats els 20 s.

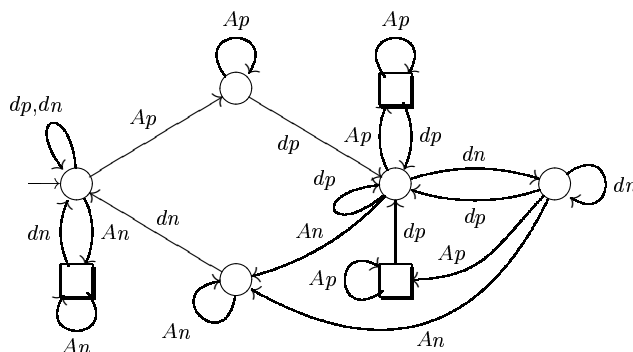


Figura 4.27: Model del procés de mecanitzat amb detecció d'alarmes.

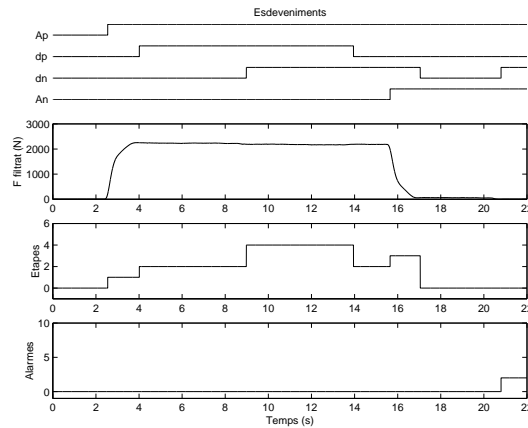


Figura 4.28: Aplicació del SIS millorat a l'assaig *B*.

L'Apèndix C mostra i comenta els resultats obtinguts amb el nou supervisor pels assaigs *A* i *C*.

En definitiva, s'ha pogut dissenyar un SIS que permet identificar les etapes d'un procés de mecanitzat, tenint en compte que es pot produir una manca de lubricant. Però a més, és capaç de assenyalar certs comportaments inesperats.

No obstant, arribats a aquest punt, convé fer una sèrie d'observacions importants sobre les limitacions del SIS que s'ha dissenyat:

**Risc de pronòstic erroni de manca de lubricant.** El símptoma que s'ha establert per assenyalar la manca de lubricant podria no necessàriament ser causat per una manca de lubricant. Un canvi brusca de geometria en la peça a mecanitzar o bé en la profunditat del tall podria originar igualment un petit decreixement en el senyal d'esforç.

**La manca de lubricant s'ha de produir durant el mecanitzat.**

Amb els assaigs disponibles, la dinàmica que assenyala la manca de lubricant s'origina a partir d'una situació de mecanitzat normal. Per això, abans de dissenyar el SIS s'ha precisat que el seu objectiu principal seria detectar l'esdeveniment *aturada de lubricació*, no pas el de *manca de lubricació*.

Segurament, disposar d'altres senyals que mesurin les vibracions, o les emissions acústiques, ajudaria a millorar i completar la capacitat de pronòstic del SIS. Llavors, també seria necessari disposar de més assaigs que il·lustrin les diverses situacions per les que interessa poder discriminar-ne el pronòstic.

## 4.4 Conclusions

La metodologia de disseny del SIS ha estat validada amb dos processos diferents. Si bé els models obtinguts són aparentment simples, aquestes aplicacions han permès il·lustrar les dificultats que es poden trobar en l'utilització de les tècniques proposades amb casos reals.

Ha estat possible dissenyar un SIS que pugui identificar tant comportaments esperats com inesperats. L'únic a tenir en compte és que el coneixement que permet identificar cadascun d'aquests comportaments s'ha d'incorporar al model. Aquest coneixement específic es pot afegir directament — tal com s'ha fet amb el procés biotecnològic — o bé mitjançant la operació de composició paral·lela — tal com s'ha fet amb el procés de mecanitzat.

Tot comportament no contemplat pel model és ignorat; aquesta és la manera de treballar de STATEFLOW<sup>TM</sup>. Això vol dir que tots aquells esdeveniments no previstos en el moment de produir-se són ignorats. Només són tinguts en compte aquells esdeveniments detectats que permeten identificar estats significatius del procés.

En el Capítol 3, s'ha parlat de representar un procés mitjançant un generador. Un generador ha d'incorporar totes les seqüències possibles. No obstant, el model en STATEFLOW<sup>TM</sup> que implementa el supervisor no les incorpora explícitament totes. Per ser consistents amb la definició de generador, convé interpretar que el model en STATEFLOW<sup>TM</sup> és com si incorporés una transició reflexiva per a cadascun dels esdeveniments ignorats. Es pot interpretar que el model en STATEFLOW<sup>TM</sup> permet implementar un generador amb funcions de filtre d'esdeveniments.

S'ha pogut comprovar com la metodologia depèn en gran mesura del conjunt inicial d'enregistraments disponibles pel disseny del SIS. El SIS resultant sabrà reconèixer aquelles situacions que apareixin en algun d'aquests enregistraments, i que estiguin convenientment comentades per l'expert. Sempre que s'aportin nous enregistraments acompanyats del coneixement expert adient, serà possible millorar el SIS, de forma que sigui capaç de reconèixer més situacions.

