Capítol 2- Disseny del sistema persona-màquina

2.1 Introducció

L'objectiu d'aquest capítol és concretar la metodologia de recerca que es farà servir (Arnau 1996). En primer lloc comentar que en àrees multidisciplinars com és l'estudi d'operaris en el lloc de treball, no hi ha teories genèriques que agrupin tots els coneixements disponibles. Moltes vegades no es tracta tant de definir un marc conceptual dins una disciplina científica concreta, com del fet de la transversalitat per tal de creuar les diverses disciplines per obtenir quelcom rellevant de cada una d'elles. Una de les aproximacions més exitoses és l'estudi de camp dels operaris en el lloc de treball, - com per exemple els que es fan sobre operaris de sales de control de plantes nuclears -, generant-se abundant literatura científica al voltant del *rendiment*, la *seguretat*, i els *aspectes cognitius* humans respecte grans volums d'informació (Woods et. al. 1987), (Woods i Roth 1988).

La temàtica permet una dinàmica interactiva entre lloc de treball i recerca de laboratori ja que es produeix un cicle que comença en els estudis de camp, es trasllada a la recerca de laboratori amb noves aportacions teòriques, i es retorna de nou al lloc de treball com a millores en el disseny dels sistemes persona-màquina.

Dins de l'ampli espectre de models de complexes sistemes persona-màquina, aquest treball s'enfoca cap a l'aspecte de presa de decisió. Així es fa ús del diagrama de decisió extret dels estudis de camp de Rasmussen (Rasmussen et. al. 1994), (Vicente 2000). A continuació es planteja la relació persona-màquina des del punt de vista del disseny d'una interfície que serveixi de diàleg. Tal com es planteja el problema, es fa ús de la simulació per tal de que l'operari faci evolucionar la planta virtual des d'un estat inicial fins a un estat final.

Sobre la simulació dinàmica s'incorporen la pressió temporal i la presa de decisió, per tal de constituir un sistema que sigui representatiu de situacions industrials on l'operari es troba freqüentment en moments de perill en el bon govern de la planta. Per tal de crear

aquesta simulació cal modelar la dinàmica de la planta i implementar el codi de programació que permetrà la monitorització.

Respecte a la dinàmica de la planta s'ha optat per la representació clàssica de la mecànica de fluïts amb tancs, vàlvules i canonades, això si, convenientment simplificada ja que no és l'objectiu genèric d'aquesta tesi aportar un modelat profund en aquesta disciplina, tot i que el model que es presenta és fàcilment ampliable.

I pel que fa al programari de simulació s'ha escollit un entorn de programació obert que permeti la flexibilització dels conceptes que hi han de tenir cabuda. El programari ha de permetre encabir internament el codi de programa i oferir externament una interfície que serveixi de diàleg.

Reprenent el fil del primer capítol, es presenta de forma concreta el micro-món de treball. Atenent a la jerarquia de propòsits, consigna, i interfície persona-màquina, es dissenya un micro-món representatiu d'un sistema dinàmic complex governat per la pròpia persona (cf. Taula 1.1 del Capítol 1). El concepte *sistema*, en el context d'aquest treball, implica la interacció entre persona i micro-món. El lligam entre ambdós són les accions de control manual. Aquesta definició operacional de *sistema* és una versió simplificada de la versió que es fa servir dins *la psicologia social* aplicada al treball que considera el *sistema* com un complicat conjunt d'interrelacions entre persones, formació, disseny d'equipament, procediments d'operació i entorn (Díaz 2000).

2.2 Estudi de camp: diagrama de decisió

Els models de sistemes persona-màquina complexes trobats a la literatura, emergeixen dels requeriments en el context del treball i són, inicialment, identificats per estudis de camp. Durant la dècada dels 70, Rasmussen fa estudi de camp sobre operaris de plantes nuclears (Rasmussen 1974 i 1976; citats a Vicente 1999). Entre d'altres models genèrics de sistemes persona-màquina comnplexes, - on es descriuen les habilitats cognitives, percepció i aspectes motors- , en aquest treball s'enfoca el problema en un aspecte parcial anomenat *decision ladder*. El diagrama de decisió és una eina precisa per descriure tasques en sales de control. Rasmussen extreu aquest diagrama mitjançant la recollida de dades amb l'ajut de qüestionaris verbals en operaris de sala de control en planta nuclear. Cal fer notar que aquest diagrama de decisió és una eina de modelat valuosa per l'estudi directe dels operaris en el lloc de treball i ha servit durant anys com a model de referència en ergonomia (física i cognitiva) i així ho fan constar altres investigadors en diversos estudis aplicats (Ivergard 1989). Aquesta eina de modelat està inicialment pensada per la branca de l'ergonomia cognitiva anomenada *Ecological Research,* recerca ecològica*,* on el sistema persona-màquina està vinculat al seu entorn, però al llarg dels anys d'investigació també s'ha mostrat flexible per donar cabuda a la recerca amb micro-mons (Vicente i Rasmussen 1990). Així ho constata l'investigador Vicente, especialitzat en anàlisi cognitiu del treball, que aplica el *decision ladder* de Rasmussen sobre els micro-mons *DURESS* i *DURESS II* com a eina adaptada per l'estudi del control de processos (Vicente 2000).

En aquest apartat es creu oportú fer una revisió d'aquest diagrama de decisió incidint només en els aspectes genèrics que emmarquen clarament el treball de tesi que es porta a terme. La següent figura mostra el diagrama de decisió adaptat.

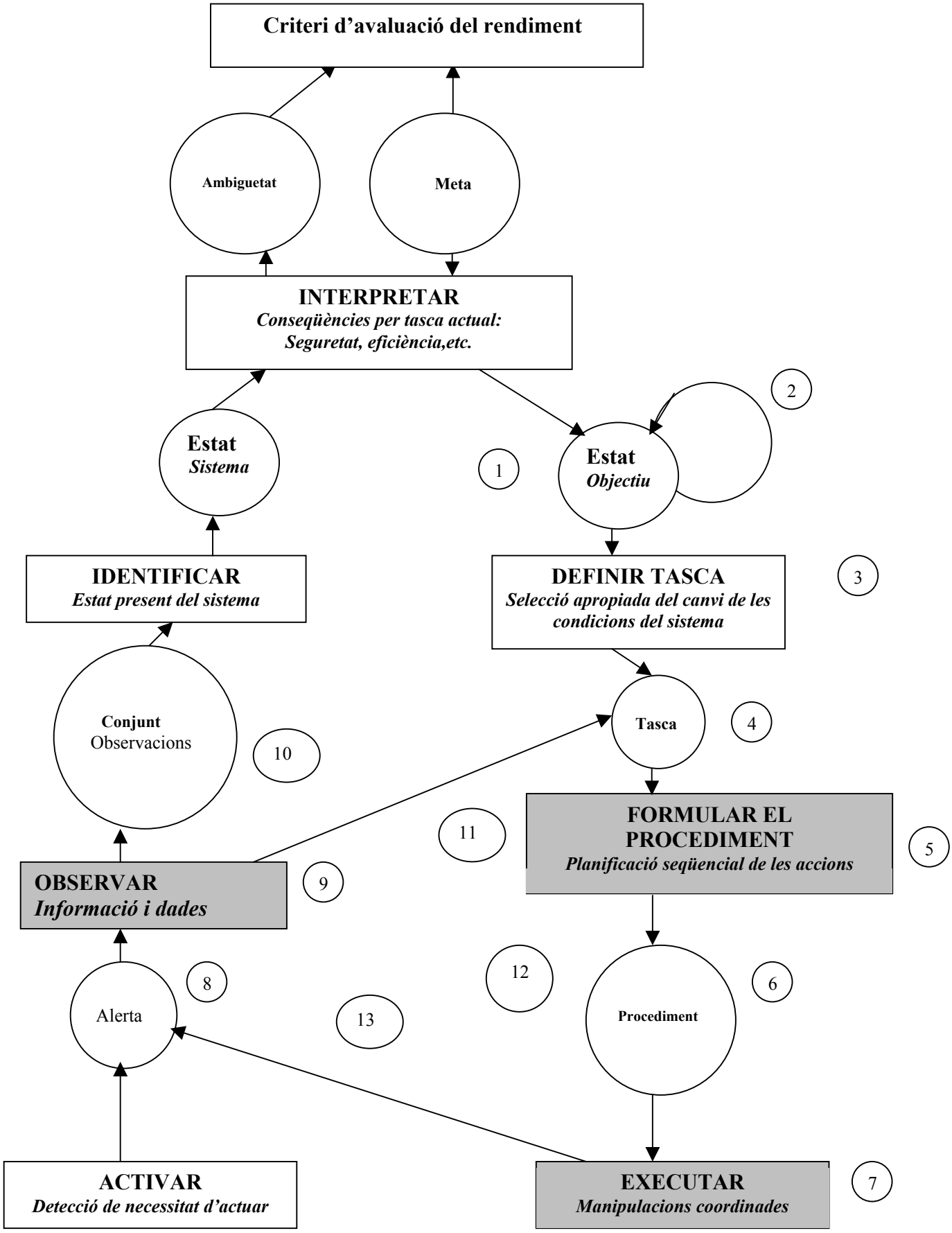

Figura 2.1 – Diagrama de decisió

En aquest diagrama el cercle indica un senyal, i el rectangle indica una activitat a fer (avaluar, interpretar, identificar, definir, observar, formular, activar, executar). El diagrama es composa d'una seqüència de passes que esdevé en llaç tancat a partir del pas 10. Les passes són:

1. Estat objectiu
En el context de control de processos aquest estat objectiu s'expressa en forma de consigna
2. Descomposició de la fita principal en sub-fites
En sistemes complexes la consigna porta implícit la descomposició de la fita principal en sub-fites. (Exemple: els sistemes MIMO de dimensió m, *Multiinput, multioutput*, s'estudien inicialment en forma de m sistemes SISO)
3. Definir tasca
L'operari ha de seleccionar els canvis plausibles sobre la planta.
4. Tasca
S'indiquen aquelles tasques necessàries per aconseguir cada una de les subfites.
5. Formular el procediment
Amb les tasques es formula els procediments a seguir.
6. Procediment
Després de proposar diverses solucions alternatives, es pren la decisió d'aplicar una planificació concreta
7. Executar
L'execució es concreta en forma d'accions de control sobre la planta.
8. Alerta
Abans, o mentre, les manipulacions , és important que la persona estigui en un estat de vigilància, seguiment i monitorització de l'estat, per determinar quan és el moment d'estabilitzar l'estat.
9. Observar
Processament d'informació a partir d'icones gràfics o numèrics presents en la interfície
10. Tasca
Mantenint la consigna com a estat objectiu, l'operari expert avalua la seva pròpia execució i es capaç de refer la seva planificació en cas de que no es segueixi la consigna. Amb la realimentació, l'operari es capaç d'anticipar les conseqüències de les seves accions.
11. Formular el procediment
L'aprenentatge porta a l'operari a determinar quines accions són necessàries a ser realitzades.
12. Procediment
Millora respecte l'estat 6 ja que l'operari ja s'ha fet un model mental de la situació i decideix un pla.
13. Executar
Millora de l'execució en quan es posa de manifest l'aprenentatge vers el mètode d'assaig i error.

Bona part d'aquest diagrama de decisió s'agafa com a referent en el disseny del sistema persona-màquina d'aquesta tesi, sobretot per l'aspecte cíclic d'observar, formular el procediment i executar, indicats en color gris en la Figura 2.1

2.3 Domini temporal

En la representació seqüencial del diagrama de decisió no és fa explícit el factor temporal. Un aspecte rellevant en tota dinàmica és el paràmetre *temps*, es a dir, *com evoluciona la interacció al llarg dels temps i davant canvis en les decisions o en la dinàmica de la planta*. Això permet la construcció de diagrames que mostren de forma explícita el paràmetre temps dins la interacció. La Figura 2.2 mostra un cas particular on una línia horitzontal simbolitza l'evolució lineal temporal de la planta, i la seva interacció amb l'operari mitjançant les fletxes:

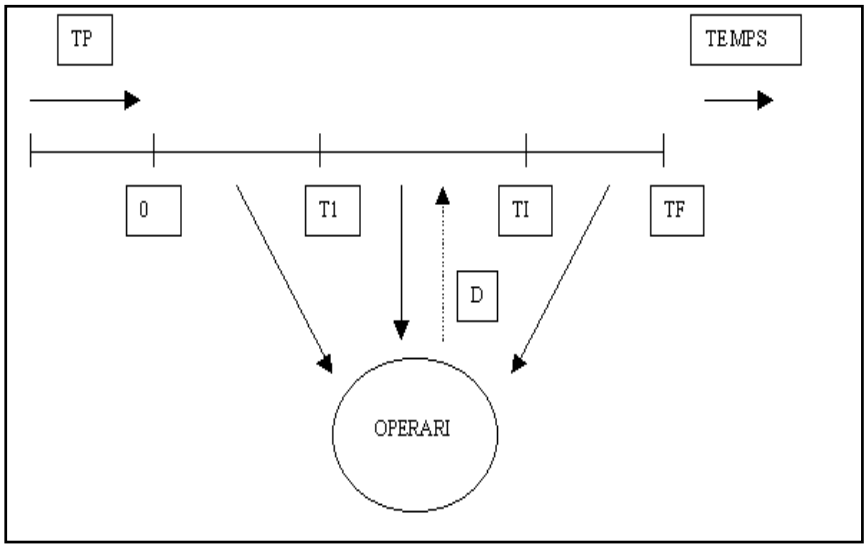

Figura 2.2- Esquema de l'evolució de la planta per l'actuació de l'operari

Dins la Figura 2.2, la percepció i l'execució es mostren amb fletxes del tipus:

D : decisió posada en pràctica ⇢

Observació ⟶

Sobre la línia horitzontal es defineixen valors numèrics quantitatius del tipus:

TP : temps previ
0 : origen del temps
T1 : instant primera acció humana
Ti : instant darrera acció humana
TF : fi de la prova

Atenent al fet de que la planta evoluciona sota les decisions de l'operari des d'un estat inicial a un estat final, es poden fragmentar en diversos intervals les fases d'interacció de la persona amb la prova.

INTERVAL	ESTAT
[TP , 0]	Estable ; sense Risc
[0 , T1]	Estable ; sense Risc
[T1 , Ti]	Inestable ; amb Risc
[Ti , TF]	Estable ; sense Risc

Taula 2.1 – Relació entre interval de temps i tipus d'estat respecte al risc

Així per exemple:

- Interval [TP, 0]: interval que va des de que la persona visualitza per primer cop la planta i la consigna que cal aconseguir.
- Interval [0, T1]: va des de l'inici del rellotge temporal fins a l'instant en que la persona fa la primera acció.
- Interval [T1, Ti]: és aquell que inclou el conjunt de manipulacions o accions fetes sobre la planta. La durada temporal es coneguda habitualment per *temps d'execució*
- Interval [Ti, Tf]: recull la darrera part on la planta evoluciona fins al seu estat final i es dóna per finalitzada la interacció.

L'associació entre el modelat temporal i el diagrama de decisió es troba en la seqüència lineal dels fets representada en la Figura 2.2. En concret, la seqüència mostra fases de: a) Observació, b) Observació, formulació del procediment i execució, c) Observació.

Dins l'interval central [T1, Ti] entren en joc la percepció del risc i la controlabilitat del sistema. El sistema és estable i sense risc quan encara no hi ha una acció inicial per part de la persona. Un cop feta la primera acció, les següents accions o inaccions poden constituir un risc pel bon funcionament de la planta. La darrera fase pertany al cas en que l'operari dóna per finalitzada la seva participació activa, tot i que la planta encara està evolucionant.

En l'estudi del modelat temporal hi ha una sèrie d'aspectes a comentar:

a) ***Espai d'Estat***
Des del punt de vista de l'automàtica, - considerant concretament la tasca de control manual -, es disposa de la tradicional representació de l'espai d'estat. Les variables emprades normalment són X com a vector representatiu del conjunt de variables, i U com a vector de control. L'operari intervé externament aportant aperiòdicament un element u d'aquest conjunt U. Així el sistema format per operari i planta evoluciona des d'un estat inicial a un estat final mitjançant la seqüència d'accions fetes per l'operari. Si es disposa de diversos operaris, per a tots ells l'estat inicial és el mateix, mentre que l'evolució dinàmica, i l'estat final, són particulars de cada interacció

Cal tenir en compte si les variables X i U són continues o discretes, així com la complexitat de la planta (lineal, no lineal) que fan que el rang de situacions a estudiar sigui gran. Per exemple, en el modelat de comportament de subjectes en la conducció d'automòbils, es disposa de la representació en espai d'estat en la seva versió continua, tant per X com per U, aplicant en l'anàlisi cadenes de Markov i filtres de Kalman (Pentland i Liu 1999). Però hi ha altres situacions més complexes on l'anàlisi és dificultós; així per exemple, es pot donar una situació híbrida quan X està expressada en forma continua, mentre que U està

expressada en forma discreta. Per cada acció de la persona u(k) ∈ U espai de control, on k és l'instant de cada acció, s'obté un estat particular x(k) ∈ X espai de la planta. L'estat de la planta x(k) evoluciona seguint l'equació en diferencies:

$$X(k) = f(x(k-1), u(k))$$

On k és la discretització del temps.

b) *Pressió temporal*
Hi ha tres factors rellevants que no apareixen de forma explícita en els diagrames de les Figures 2.1 i 2.2 :

- Complexitat de la tasca a realitzar
- Complexitat de la dinàmica pròpia de la planta
- Presència o absència d'events aleatoris

A l'operari se li demana la realització concreta d'unes accions raonades, i sovint, en entorn industrial, aquestes decisions i accions s'han de prendre i executar sota pressió temporal (Smith i Hancock 1992). No es deixa la reflexió durant hores, sinó que l'execució ha de ser força ràpida davant una sèrie d'imprevistos. Els imprevistos poden succeir per la pròpia evolució dinàmica de la planta al cap d'un temps de funcionament, o bé per la presència d'events aleatoris no previstos inicialment. Aquest factors condicionen la presa de decisió sota pressió temporal. I en moltes ocasions, el que s'observa és un dèficit o un canvi en el rendiment de l'operari, - el qual intenta adaptar-se a la nova situació creada -, portant a vegades a situacions extremes (accident).

c) *Expertesa*
L'operari te assignada una tasca concreta a realitzar, tasca més o menys complexa en funció de la seva formació i habilitat. Aquest pot disposar o no de coneixement previ de la planta, en quant a lligams relacionals entre variables. En altres ocasions no cal un coneixement enciclopèdic, senzillament quan s'activa un *led* d'alarma l'operari ha de prémer un dispositiu i parar la màquina o la planta.

Ara bé, cal diferenciar dues situacions: la primera en la que l'operari te tot el protocol de passes a fer en una situació d'emergència, i la segona en la que es deixa llibertat de decisió ja que l'operari és expert. Ja es pot veure que en situacions de *baixa emergència* el protocol és suficient, mentre que en situacions *d'alta emergència*, deixar que sigui l'operari el que prengui decisions importants és molt delicat, sobretot quan apareixen events aleatoris no previstos.

Tot i que l'operari pot rebre formació sobre situacions imprevistes, el que no queda clar, és com la fatiga o l'estrès poden afectar la seva decisió (Díaz 2000). I encara es troben més factors que alteren el rendiment de l'operari com per exemple les limitacions cognitives en tasques complexes, en concret pel que fa a la generació pròpia d'estratègies sense ajut extern, o la baixa adaptació davant canvis de l'entorn.

2.4 Modelat dinàmic de la planta

En el moment d'escollir la planta virtual l'elecció ha estat dins la mecànica de fluïts i en concret per plantes formades per tancs oberts per la part superior, canonades i vàlvules de control de pas d'aigua, considerant el moviment del fluït en condicions ideals. El motiu d'aquesta elecció és triple: en primer lloc hi ha un antecedent en els treballs de Woods sobre la generació de micro-mons per l'estudi d'operaris de plantes nuclears (Woods et. al. 1987), (Woods i Roth 1988). El segon antecedent són els esborranys creats dins el projecte *Wahrps*[1], en el domini de la neurologia, encapçalats per J. Pastor dins la unitat U455 de l'*INSERM* (Pastor et. al. 1998). El tercer motiu recau en el fet de que les plantes hidràuliques són models estandaritzats que es fan servir de forma genèrica en investigacions de control i supervisió (Leylal et. al. 1994), (Melendez et. al. 1996).

La connectivitat entre tancs, així com la seva disposició vertical o horitzontal, permet múltiples dissenys de plantes. Per mostrar un exemple, la disposició de tancs en forma horitzontal en el cas de planta amb 2 tancs de la Figura 2.3, e interconnectats entre si, permet l'estudi de:

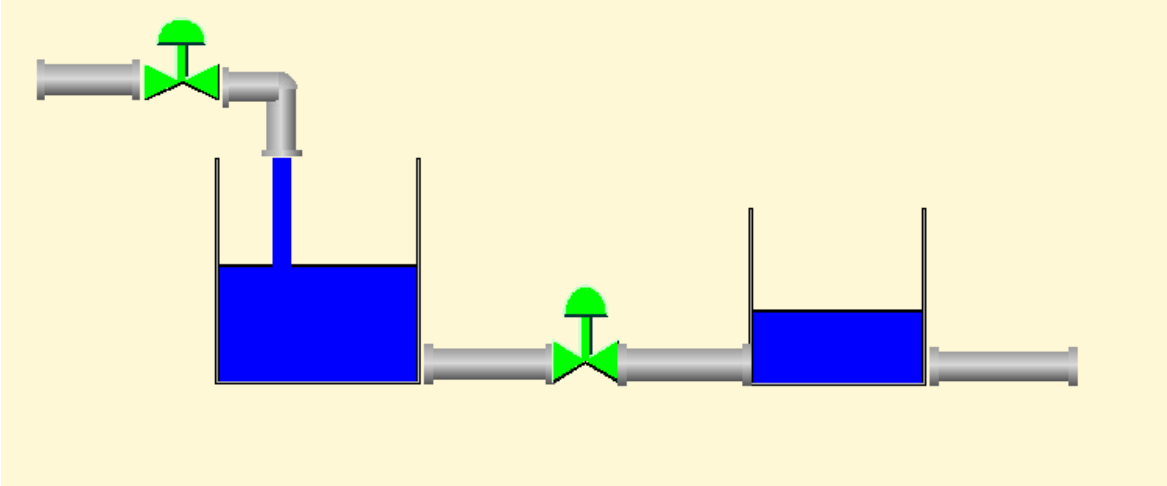

Figura 2.3 – Planta de 2 tancs en disposició horitzontal

- Control de nivell de fluït en els tancs
- Nombre mínim de vàlvules per governar els 2 tancs
- Linealització respecte un punt de treball

es a dir, aspectes típics dins l'àmbit de l'automàtica.

Un segon exemple, Figura 2.4, amb la disposició de tancs en forma vertical en el cas de planta amb diversos tancs intermitjos, alguns d'ells interconnectats entre si (Travé-Massuyès et. al. 1997), (Pasquet 1995).

[1] Worlds for Assessing Human Reasoning Process Supervision

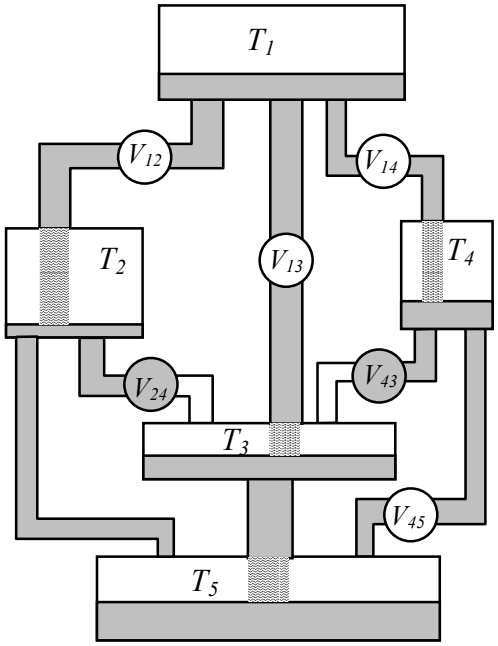

Figura 2.4 Planta de 5 tancs en disposició vertical

que permet l'estudi de:

- Casuística de maneres diferents de resoldre la tasca
- Rapidesa en l'execució
- Situacions de risc de vessament

es a dir, aspectes característics de *solució de problemes* i de mecanismes de presa de decisió per part de l'operari.

En aquesta disposició vertical l'aigua flueix de dalt a baix sempre que s'obren les vàlvules de pas. Aquesta planta es pot ampliar fàcilment mitjançant més canonades, tancs i vàlvules, complicant l'execució de les accions però mantenint els mateixos objectius a estudiar.

Així és factible la generalització a un model format per *n* tancs, a diferents nivells verticals i connectats entre si amb canonades. Per això, es disposa d'un tanc superior que conté tota l'aigua que circularà per la planta, i un altre d'inferior que serà el destí final de tota aquesta aigua, amb la mateixa capacitat que el primer tanc.

Un cop fixats aquest components extrems, la forma de la planta vindrà donada pel nombre de tancs intermitjos i les connexions entre ells. L'estructura general d'aquesta planta és mostra en la Figura 2.5 :

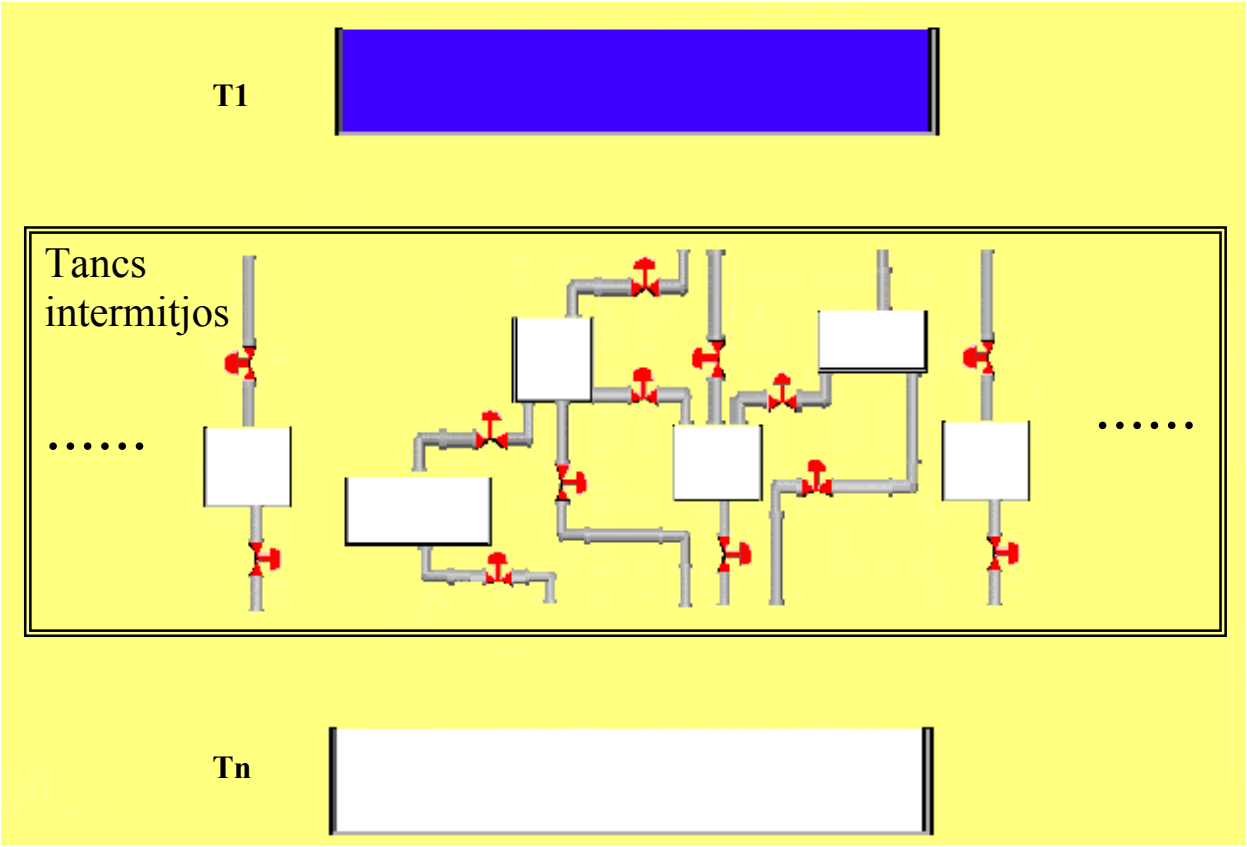

Figura 2.5- Estructura de planta amb n tancs

Les especificacions que s'han de complir són:

- El tanc superior només tindrà canonades de sortida que connectaran amb els tancs intermitjos
- El tanc inferior només tindrà canonades d'entrada que vindran d'alguns tancs intermitjos
- Els tancs intermitjos es podran connectar entre ells a diferents nivells però no és obligatori connectar-los tots entre si
- Si s'estableixen diverses alçades, no tots els tancs intermitjos tenen que està connectats directament al tanc superior
- Totes les connexions s'hauran de realitzar entre tancs de diferents nivells, circulant l'aigua sempre des del nivell superior a l'inferior.
- A cada canonada li correspon una vàlvula, estan així la planta perfectament regulada

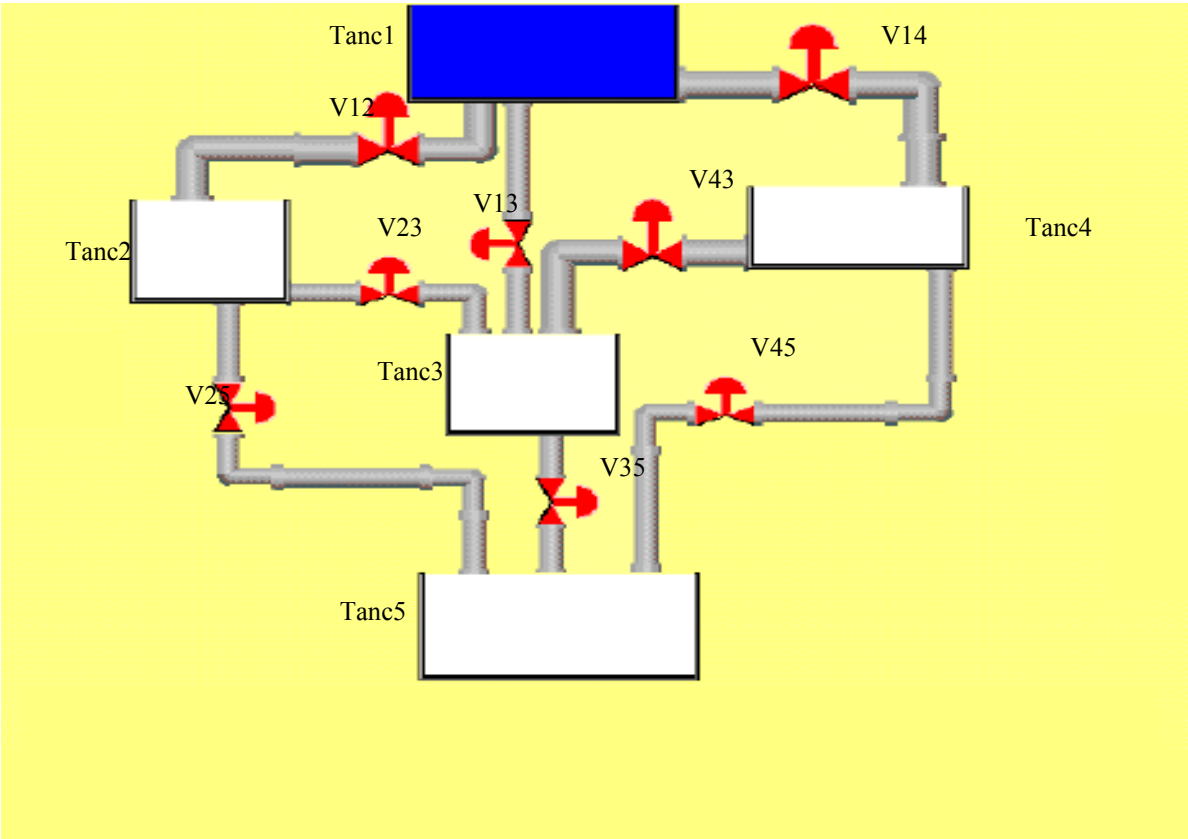

Figura 2.6- Planta de 5 tancs sota l'interfície gràfica de LabVIEW

Un cas particular de planta és aquell en el que $n = 5$ tancs, i on cada canonada disposa de la seva vàlvula, a diferència de la Figura 2.4 on les vàlvules inferiors dels tancs intermitjos no disposen de vàlvules (Figura 2.6) (Eyrolle et. al. 1996), (David 1994).

De forma bàsica les principals lleis físiques necessàries per modelar plantes com les de la figura anterior, son el teorema de Torricelli, el teorema de Bernouilli, i la condició de moviment del fluït en condicions ideals sense turbulències (Mott 1996), (Tipler 2001), (Creus 1979). Els principals conceptes associats són:

- La variació de nivell de fluït en un tanc és directament proporcional a la variació de cabal e inversament proporcional a la secció del tanc
- La variació del cabal és positiva quan entra més fluït del que surt, és negativa en cas contrari, i roman constant quan els cabals d'entrada i sortida es compensen
- L'estat de la vàlvula condiciona aquesta variació de nivell, de manera que si les vàlvules estan tancades no hi ha cap evolució dinàmica.

Els principals paràmetres que intervenen són:

P_A = pressió atmosfèrica, en $\frac{Kg}{ms^2}$ o $\frac{N}{m^2}$.

ρ = densitat, en $\frac{Kg}{m^3}$.

g = constant gravitaria, 9'80 $\frac{m}{s^2}$.

q_e: cabal d'entrada, en $\frac{m^3}{s}$.

q_s: cabal de sortida, en $\frac{m^3}{s}$.

A: secció del tanc, en m^2.

q_{ij} = cabal entre el tanc i i el j, en $\frac{m^3}{s}$.

Kv_{ij}: constant de proporcionalitat de la vàlvula entre el tanc i i el j, en m^2.

a_{ij}: grau d'obertura de la vàlvula entre el tanc i i el j. ($0 <= a_{ij} <= 1$)

P_i: pressió tanc i, en $\frac{Kg}{ms^2}$ o $\frac{N}{m^2}$.

Taula 2.2. Paràmetres de modelat hidràulic

Per una planta que tingui 5 tancs amb la disposició vertical remarcada en la Figura 2.6, el model matemàtic associat és un conjunt de 5 equacions diferencials ordinàries no lineals. La variació del nivell de fluït per cada tanc s'expressa com:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{dh_1}{dt} &= \frac{-\left(K_{12}a_{12} + K_{13}a_{13} + K_{14}a_{14}\right)\sqrt{gh_1}}{A_1} \\
\frac{dh_2}{dt} &= \frac{K_{12}a_{12}\sqrt{gh_1} - \left(K_{23}a_{23} + K_{25}a_{25}\right)\sqrt{gh_2}}{A_2} \\
\frac{dh_3}{dt} &= \frac{K_{13}a_{13}\sqrt{gh_1} + K_{23}a_{23}\sqrt{gh_2} + K_{43}a_{43}\sqrt{gh_4} - K_{35}a_{35}\sqrt{gh_3}}{A_3} \\
\frac{dh_4}{dt} &= \frac{K_{14}a_{14}\sqrt{gh_1} - \left(K_{43}a_{43} + K_{45}a_{45}\right)\sqrt{gh_4}}{A_4} \\
\frac{dh_5}{dt} &= \frac{K_{25}a_{25}\sqrt{gh_2} + K_{35}a_{35}\sqrt{gh_3} + K_{45}a_{45}\sqrt{gh_4}}{A_5}
\end{aligned}\right\}$$

Figura 2.7 – Sistema d'equacions per la planta de 5 tancs

El sistema d'equacions diferencials mostra un comportament no lineal, per la presència de les arrels quadrades sobre les variables nivell, expressades en aquest context per la lletra h_i.

L'avantatge del modelat dinàmic hidràulic davant altres modelats és la facilitat de generalització des d'una planta de 5 tancs, a una planta de *n* tancs també des del punt de vista de generalització de les equacions diferencials.

Analitzant el sistema de equacions de la Figura 2.7, s'observa que per cada equació es poden diferenciar dos termes, un de positiu i un de negatiu. El terme positiu correspon al conjunt de cabal entrant al tanc, mentre que el terme negatiu correspon al conjunt de cabal sortint del tanc. En qualsevol cas, mai pot existir una component *jj*, ja que representaria un camí que surt del tanc *j* i torna al tanc *j*, opció que es considera sense sentit. En general, qualsevol component representat per dos índex *mn*. El primer, *m*, representa el tanc d'origen, mentre que el segon, *n*, representa el tanc destí. De totes les reflexions anteriors es dedueix el següent sistema d'equacions per la planta de n tancs:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{dh_1}{dt} = \frac{-\left(K_{12}a_{12} + \Lambda + K_{1i}a_{1i}\right)\sqrt{gh_1}}{A_1} \\
&\qquad\qquad \text{M} \\
&\frac{dh_j}{dt} = \frac{K_{1j}a_{1j}\sqrt{gh_1} + \Lambda + K_{(j-1),j}a_{(j-1),j}\sqrt{gh_{(j-1)}} + K_{(j+1),j}a_{(j+1),j}\sqrt{gh_{(j+1)}} + \Lambda + K_{ij}a_{ij}\sqrt{gh_i}}{A_j} - \\
&\qquad - \frac{\left(K_{j1}a_{j1} + \Lambda + K_{j,(j-1)}a_{j,(j-1)} + K_{j,(j+1)}a_{j,(j+1)} + \Lambda + K_{ji}a_{ji}\right)\sqrt{gh_j}}{A_j} \\
&\qquad\qquad \text{M} \\
&\frac{dh_i}{dt} = \frac{K_{1i}a_{1i}\sqrt{gh_1} + \Lambda + K_{(i-1),i}a_{(i-1),i}\sqrt{gh_{(i-1)}}}{A_i}
\end{aligned}\right\}$$

Figura 2.8 – Sistema d'equacions per la planta de n tancs

Indicar finalment que en aquests models s'han considerat:

- Fluït sense turbulències; sense viscositats
- Dinàmica de la canonada menyspreable davant la dinàmica del tanc

encara que aquest aspectes es poden incorporar en funció del grau de precisió que es vulgui tenir en el model.

Un altre avantatge del modelat hidràulic és la facilitat per la discretització de les equacions diferencials a equacions en diferències tot definint un període de mostreig adient. D'altre banda, en el moment d'implementar una simulació del model també es pot escollir una representació més senzilla de les variables. Enlloc de treballar amb la variable nivell indicada en aquestes línies per *h*, es pot treballar amb la variable capacitat *c*, expressada en litres, i la variable cabal *q* expressat en litres per segon.

El cabal d'aigua que surt per la canonada d'un tanc en un instant *k* és:

$$q(k) = A_{canonada} \cdot v = A_{canonada} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h(k-1)} \cdot 1000 \ [l/s]$$

on el seu valor variarà en funció del estat anterior en el que es trobi l'alçada de l'aigua del tanc d'on surt la canonada.

Si a aquesta canonada se li afegeix una vàlvula i se li aplica un temps de mostreig, s'obtenen els litres que sortiran en un temps de mostreig:

$$L(k) = q(k)\cdot V(k)\cdot tm = A_{canonada}\cdot \sqrt{2\cdot g\cdot h(k-1)}\cdot V(k)\cdot tm\cdot 1000 \quad [l]$$

on:

V = estat de la vàlvula (0 o 1)
tm = temps de mostreig

Atenent a que la variació de la capacitat d'un tanc respecte el temps només depèn de la diferència de litres que entren i surten, es té:

$$\frac{dc}{dt} = \sum(qe\cdot Ve) - \sum(qs\cdot Vs)$$

on:

dc/dt = variació de la capacitat d'un tanc respecte el temps

$\sum qe\cdot Ve$ = sumatori de tots els cabals d'entrada regulats per vàlvules

$\sum qs\cdot Vs$ = sumatori de tots els cabals de sortida regulats per vàlvules

Si finalment s'afegeix un temps de mostreig, la expressió de la capacitat d'un tanc per a cada fracció de temps és:

$$c(k) = c(k-1) + [\sum(qe(k)\cdot Ve(k)) - \sum(qs(k)\cdot Vs(k))]\cdot tm \quad [l]$$

on:

c(k) = valor actual de la capacitat d'un tanc
c(k-1) = valor anterior de la capacitat d'un tanc

$\sum qe(k)\cdot Ve(k)$ = sumatori de tots els cabals d'entrada regulats per vàlvules

$\sum qs(k)\cdot Vs(k)$ = sumatori de tots els cabals de sortida regulats per vàlvules
tm = temps de mostreig

Una vegada es te la capacitat, s'ha de calcular la nova alçada del tanc en funció dels litres que contingui i la seva àrea:

$$h(k) = \frac{c(k)}{A\cdot 1000} \quad [m]$$

En el cas de planta amb 5 tancs el model matemàtic associat és un conjunt de 5 equacions en diferències:

$$c_1(k) = c_1(k\text{-}1) + (-q_{12}(k)\cdot V_{12}(k) - q_{13}(k)\cdot V_{13}(k) - q_{14}(k)\cdot V_{14}(k)\ )\cdot tm$$

$$c_2(k) = c_2(k\text{-}1) + (q_{12}(k)\cdot V_{12}(k) - q_{23}(k)\cdot V_{23}(k) - q_{25}(k)\cdot V_{25}(k)\ )\cdot tm$$

$$c_3(k) = c_3(k\text{-}1) + (q_{13}(k)\cdot V_{12}(k)\ + q_{23}(k)\cdot V_{23}(k) + q_{43}(k)\cdot V_{43}(k) - q_{35}(k)\cdot V_{35}(k)\ )\cdot tm$$

$$c_4(k) = c_4(k\text{-}1) + (q_{14}(k)\cdot V_{14}(k) - q_{45}(k)\cdot V_{45}(k) - + q_{43}(k)\cdot V_{43}(k)\ )\cdot tm$$

$$c_5(k) = c_5(k\text{-}1) + (q_{25}(k)\cdot V_{25}(k) + q_{35}(k)\cdot V_{35}(k) + q_{45}(k)\cdot V_{45}(k)\ )\cdot tm$$

Figura 2.9 Sistema d'equacions en diferències per la planta de 5 tancs

On

$$q_{12}(k) = A_{12}\ \sqrt{2\cdot g\cdot h_1(k\text{-}1)}\ \cdot 1000$$
$$q_{13}(k) = A_{13}\ \sqrt{2\cdot g\cdot h_1(k\text{-}1)}\ \cdot 1000$$
$$q_{14}(k) = A_{14}\ \sqrt{2\cdot g\cdot h_1(k\text{-}1)}\ \cdot 1000$$
$$q_{25}(k) = A_{25}\ \sqrt{2\cdot g\cdot h_2(k\text{-}1)}\ \cdot 1000$$
$$q_{35}(k) = A_{35}\ \sqrt{2\cdot g\cdot h_3(k\text{-}1)}\ \cdot 1000$$
$$q_{45}(k) = A_{45}\ \sqrt{2\cdot g\cdot h_4(k\text{-}1)}\ \cdot 1000$$
$$q_{23}(k) = A_{23}\ \sqrt{2\cdot g\cdot h_2(k\text{-}1)}\ \cdot 1000$$
$$q_{43}(k) = A_{43}\ \sqrt{2\cdot g\cdot h_4(k\text{-}1)}\ \cdot 1000$$

2.4.1 Comportament de la planta

Continuant amb aquest desenvolupament, un cop es disposa del modelat dinàmic de la planta, es desitja:

- Incloure aquestes equacions en forma de funció editable en entorn d'anàlisi numèric
- Canvi de paràmetres o de models amb facilitat
- Estudi del comportament de la planta
- Visualització de resultats

això permet al dissenyador tenir un ampli ventall de tipologies diferents de models de plantes, i eines per l'anàlisi del seu comportament. Per aquesta tasca es tria el programari MATLAB-Simulink i s'utilitza una funció especial anomenada *S-Function*. Aquesta funció permet incloure el model de la planta[2], en el format d'equacions en diferències, en forma

[2] La S-function de Simulink és adient per incloure models no lineals de sistemes dinàmics

matricial, o bé en format d'equacions diferencials ordinàries (Simulink 1997). Un cop definit la planta en forma de *S-Function*, es pot definir un bloc gràfic *S-Function* dins de Simulink. Aquesta solució permet :

- Canviar de planta i de model simplement canviant la funció S-Funtion
- Fàcil variació de paràmetres de la planta des de la pantalla de Simulink i MATLAB
- Extracció de dades gràfiques o dades numèriques

El model gràfic de 5 tancs realitzat amb Simulink i encabint les equacions diferencials ordinàries és el que es presenta a la Figura 2.10

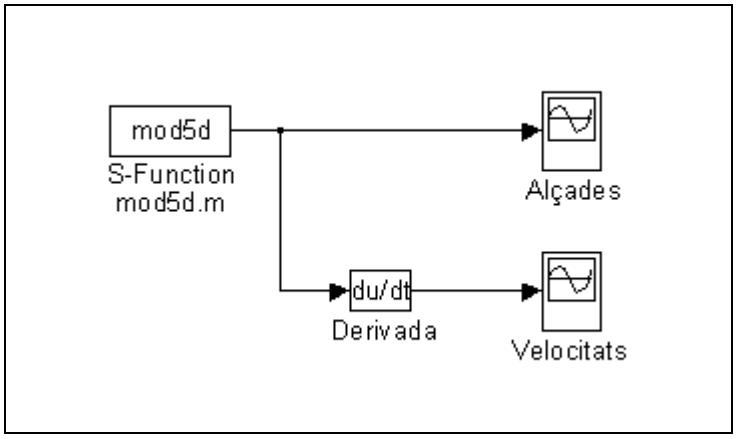

Figura 2.10- Model gràfic sobre Simulink

Tot seguit es comenta els diferents blocs del model gràfic:

- **S-Function mod5d.m:** correspon al bloc creat per la funció *S-Function.*. Permet la introducció dels diferents paràmetres del model de forma senzilla clicant amb el ratolí sobre el bloc gràfic

- **Derivada:** correspon al bloc *derivative* de Simulink i permet l'obtenció de la variació temporal del nivell.

Aquest traspàs del modelat d'equacions a entorn d'anàlisi numèric permet l'inici de l'estudi del comportament de la planta. Les proves que d'aquí se'n deriven permeten tenir un coneixement previ de la planta, abans que qualsevol usuari faci proves, entenent que llavors coexistiran la dinàmica de la planta amb la dinàmica imposada per l'operari.

Per tal de simplificar la notació, es consideren el vectors:

$$X=[h1\ h2\ h3\ h4\ h5]$$
$$a=[a12\ a13\ a14\ a23\ a25\ a35\ a43\ a45]$$
$$p=[Ai,\ g,\ kij]$$

De manera que en la representació d'espai d'estat es te

$$X= f(x,a,\ p)$$

On l'evolució dinàmica de la variable ve donada per una funció que depèn de la variable d'estat X, el vector *a* que representa el valor concret de les accions de control, i el vector *p* que representa els paràmetres del model, - àrea *Ai,* gravetat *g* i constants proporcionals *kij*.

Així, en concret:

- Donada una configuració de la planta (disposició vertical, número de tancs, connexions entre tancs com les de la Figura 2.6) i amb un valor nominal concret dels paràmetres *p*, s'obté un model d'equacions diferencials ordinàries
- El model evoluciona temporalment des d'un estat inicial a un final sempre que s'especifiqui el valor del vector d'entrada *a*. Especificar concretament el vector *a* significa obtenir una evolució temporal particular
- Es considera el vector *a* com a constant; es a dir, que en una evolució sencera a només pren un sòl valor; no es considera *a(t)*
- De tot el conjunt de possibles valors que pot prendre *a*, es vol trobar aquell valor que compleixi les restriccions d'alçades dels tancs intermitjos limitades a un valor màxim, per tal de garantir la condició de no vessament
- De tot el subconjunt de valors de *a* que compleixen la condició de no vessament, es selecciona aquell valor de *a* que fa que l'evolució dinàmica sigui més breu

Amb aquest anàlisi el que s'aconsegueix és demostrar de forma empírica que la planta triada presenta una dinàmica governable amb la restricció que es vol imposar (no vessament). La simulació mostra una solució que especifica una valor concret del vector *a*, assolint unes alçades dels tancs intermitjjos per sota dels valors màxims, i amb la menor durada. Per exemple, la Figura 2.11 mostra l'evolució dinàmica particular considerant com a vector a:

- a = [1 1 1 1 1 1 0 1]

L'anàlisi de comportament de la planta serveix com a indicador parcial de la dinàmica de la planta ja que només es consideren situacions en règim estacionari al considerar el vector *a* com a fix. Quan la persona faci proves sobre el micro-món està clar que intentarà imposar la seva dinàmica sobre la de la planta desenvolupant un vector *a* que depèn del temps. No només això, sinó que el canvi de *a(t-1)* a *a(t)* només es factible en una vàlvula, ja que la persona només pot fer una acció per dispositiu, - no es considera el cas de múltiples accions en el mateix instant de temps.

Així es pot donar el cas de que diverses accions fetes per la persona s'acostin a les gràfiques del règim estacionari. En tot cas el govern amb eficàcia de la planta comporta el que es coneix en ergonomia cognitiva com *ajust de l'acció a la dinàmica de l'entorn* (Carreras et. al. 1999).

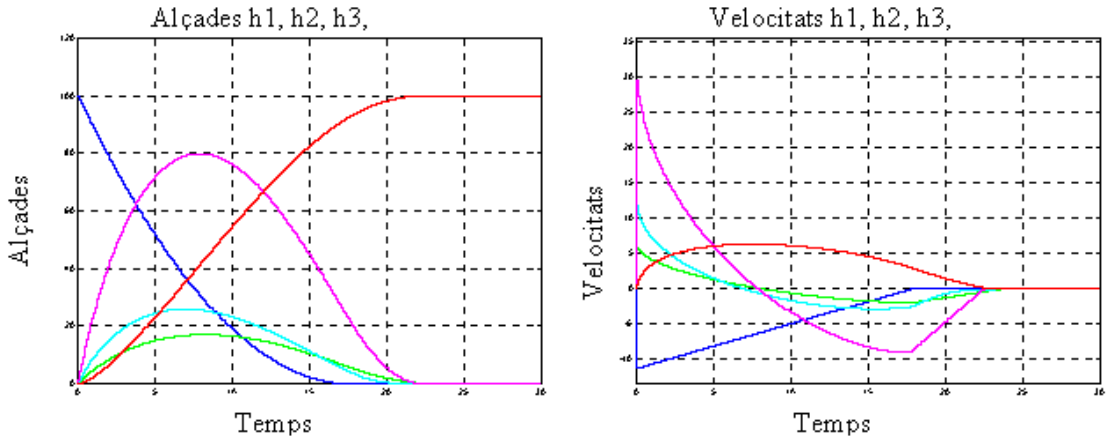

Figura 2.11 - Gràfiques de color blau: h1 i la seva velocitat.
- Gràfiques de color verd: h2 i la seva velocitat.
- Gràfiques de color cian: h3 i la seva velocitat.
- Gràfiques de color magenta: h4 i la seva velocitat.
- Gràfiques de color vermell: h5 i la seva velocitat.

2.5 Interfície gràfica

El següent pas - ja centrat en el tipus de simulació que es presentarà a la persona - és la necessitat d'un tipus de programari que compleixi unes determinades característiques: proporcioni una bona interfície gràfica, faciliti la creació de llibreria d'objectes, permeti l'extracció de dades i la seva visualització de forma gràfica, i permeti modificar el programa en funció de canvis en els paràmetres que defineixen la configuració de la planta.

La primera opció més immediata es la de realitzar el codi en un llenguatge d'alt nivell, com pot ser el C o el Pascal; són llenguatges de propòsit general totalment oberts que permeten qualsevol tipus de modificació del programa, permeten treballar amb dades numèriques, creació de llibreries, etcètera, però crear la interfície gràfica es una feina llarga i complicada. Treballar amb versions més avançades d'aquest llenguatges, com pot ser el Visual C, faciliten la feina gràfica al disposar de recursos estandaritzats, però el treballar amb gràfics segueix essent complicat.

Una altre opció consisteix en buscar d'entre els programes comercials que facilitin la part gràfica. Per exemple els programes *SCADA*, control supervisor i adquisició de dades, *supervisory control and data adquisition,* els quals estan especialitzats en la supervisió de processos, incorporen llibreries gràfiques amb components que guarden força analogia amb els trobats en la indústria: tancs, vàlvules, etcètera per a realitzar la interfície gràfica i permeten extreure dades gràficament en forma d'històrics per tal de monitoritzar situacions d'alarma. Però aquests son programes tancats, orientats habitualment a processos continus, i que no faciliten l'opció d'incorporar llibreries pròpies, descartant-se moltes vegades objectes de l'àrea de la fabricació flexible com robots industrials o *PLC*'s. Els *SCADA* estan orientats per la recollida de dades i monitorització de les variables en temps real , deixant un xic de costat la simulació de l'evolució dinàmica.

Els simuladors a events discrets treballen justament amb la simulació de l'evolució dinàmica i estan clarament enfocats cap a processos de fabricació flexible on es vol veure el rendiment d'una cèl·lula flexible de fabricació i els problemes existents en quan a colls d'ampolla, *deadlocks* i altres traves a la gestió de la producció. Exemples d'aquesta mena de programaris: *Dymola, Arena, Microsaint, Witness*. Es troben des de programaris amb una interfície gràfica perfectament simbòlica i abstracte, fins a simuladors en 3D amb llibreries predeterminades de robots i equipaments industrials com per exemple màquines-eina CNC.

L'opció mes propera en el disseny d'interfície gràfica per a un micro-món és un entorn de programació que compleixi:

- Obert a la connexió a altres programaris que permeten l'anàlisi de dades com MATLAB, SPSS, o Excel
- Programació de nivell mitg i orientada cap a la programació d'alt nivell
- Facilitat de creació d'interfície gràfica de plantes físiques (en concret botons d'actuació, *leds* indicadors, components de control de processos industrials)

Una primera opció per aquesta tasca és l'entorn *LabWindows*, el qual es basa en una programació d'alt nivell semblant al C, i que permet treballar amb llibreries gràfiques per a la realització dels objectes necessaris i per a la visualització de les dades. Una segona opció és l'entorn de programació *LabVIEW* que potencia més la vessant gràfica i *suavitza* el llenguatge de programació utilitzant el llenguatge G, a mig camí de la potencialitat del llenguatge C. En el moment de determinar l'entorn a utilitzar en aquest treball s'ha optat per la segona opció ja que *LabVIEW* és un entorn de progamació que permet un canvi ràpid en el disseny de l'interfície gràfica a realitzar, i en segon lloc, perquè és un entorn obert i en funció de les necessitats pot incloure la inserció del codi provenint d'altres llenguatges (codi C, o codi de *LabWindows*)[3]. Posteriorment, i en funció de les proves, canvis i resultats, es podria optar per un programació més robusta com per exemple la programació en Java, tot i que això ja s'aparta dels objectius inicials d'aquest treball.

LabVIEW permet dissenyar una interfície gràfica sobre la que es pot simular el control manual o automàtic de la planta, creació de llibreries gràfiques pròpies, extracció de dades, visualització i emmagatzemament. Els programes es poden modificar intuïtivament perquè es programa mitjançant icones i amb coneixements de nivell mig de programació (Mánuel 1996).

La Taula 2.3 indica propietats dels diferents programes comparats. L'apartat *tipus de programació* si es *oberta* significa que es poden crear noves funcions i llibreries pròpies, i si es *tancada* es perquè s'està limitat a les funcions pròpies del programa. La *interfície gràfica* indica si el programa té llibreries gràfiques ja fetes, o s'han de crear. L'*extracció de dades* diu si es poden extreure dades dels programes. *Visualització de dades* diu si el programa facilita funcions per a visualitzar les dades que s'extreuen. I finalment l'apartat *fàcilment modificable* indica si per a modificar les aplicacions que es realitzen es necessiten coneixements avançats de programació o bàsics.

[3] Actualment National Instruments, proveïdora de LabVIEW està desenvolupant un conjunt de llibreries que permeten adaptar LabVIEW com a un singular sistema SCADA

Programari	***Tipus de Programació***	***Interfície Gràfica***	***Extracció Dades***	***Visualització Dades***	***Fàcilment Modificable***
C	Oberta	No	si	difícil	No
Pascal	Oberta	No	Si	difícil	No
SCADA	Tancada	Si	Si	fàcil	Si
Matlab	Oberta	No	Si	fàcil	No
LabWindows	Oberta	Si	Si	fàcil	No
LabVIEW	Oberta	Si	Si	fàcil	Si

Taula 2.3. Comparativa entre programaris

La utilització de *LabVIEW* implica el treball en diversos nivells d'especificació. Alguns nivells són interns i la seva orientació és la de facilitar el codi de programació per tal de que funcioni l'aplicació. Altres nivells estan orientats cap a l'usuari, i aquí cal diferenciar el possible ús que se'n deriva. El dissenyador vol una interfície que governi la configuració de la planta, la gravació de dades, en definitiva, la posta en marxa del control de la sessió experimental. Mentre que l'operari que farà la prova, se li imposa una interfície gràfica ja dissenyada per interactuar sobre ella sense necessitat de conèixer al detall aspectes del disseny. Resumint les possibilitats els nivells desenvolupats són la creació de:

a) Llibreria d'objectes
b) Llibreria de funcions
c) Interfície de treball per l'investigador
d) Interfície gràfica per a l'usuari

2.5.1. Llibreria d'objectes

Important destacar aquesta llibreria ja que algun dels objectes formarà part de la interfície gràfica que visualitza l'usuari i per tant ha d'estar enfocada per a que sigui de fàcil utilització. *LabVIEW* disposa d'una llibreria prèvia d'objectes dedicada principalment a la instrumentació, però permet afegir nous objectes prenent com a base els existents i provenint de qualsevol programa de dibuix. Es per això que s'han creat noves llibreries d'objectes les quals s'han afegit a la paleta de controladors i indicadors de *LabVIEW*.

Normalment els objectes són de tres tipus: components (tancs), controladors (botons) i indicadors (*leds*). Els tancs són els objectes dels quals s'han creat més models, ja que depenent de l'usuari per al qual es dissenya la prova, pot estar més acostumats a identificar un tipus de tanc en el seu lloc de treball.

De canonades s'han creat amb un aspecte de relleu, i amb diferents formes (rectes, colzes, en forma de T) i posicions per a poder realitzar qualsevol tipus de connexions entre tancs (Figura 2.12).

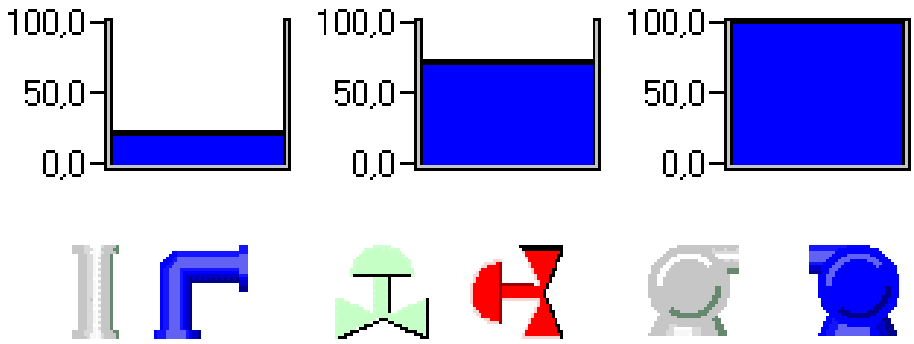

Figura 2.12 Alguns Objectes

Les vàlvules son dels objectes més importants, ja que mitjançant elles l'usuari pot controlar el sistema. S'han realitzat a partir del símbol normalitzat de les vàlvules i amb diferents tipus de cap. A més, s'ha cregut oportú millorar el disseny de vàlvula ofertat per *LabVIEW*, per un nou disseny que millori la superfície del cap i del coll de la vàlvula i que afavoreixi clickar sobre l'icone sense dificultat i propiciar el canvi d'estat (vermell/verd) sense ambigüitats (Raya 1999).

Dels objectes creats, els tancs son de tipus numèric e indiquen - si es desitja - el nivell de l'aigua en cada moment. Els tubs, les vàlvules i les bombes son de tipus booleà i indiquen si passa aigua o no.

2.5.2. Llibreria de funcions

Aquesta llibreria és d'interès per l'estructuració de la programació, i per tant, és un aspecte intern que no afecta a l'usuari. Sense entrar en detall concret cal reflexionar un moment sobre com ha de ser una estratègia de programació per a que els micro-mons siguin fàcils d'implementar. D'entrada, per realitzar la simulació dinàmica es preferible treballar amb la *capacitat* (en litres) i equacions en diferències que no pas amb *nivells* (en metres) tal com es tenia en el model d'equacions diferencials ordinàries (c.f. 2.4.Modelat dinàmic de la planta). A més el temps no és continu sinó que es presenta quantificat amb un cert període de mostreig.

Per facilitar la connexió entre tancs, i el fet de que es poden generar múltiples micro-mons, l'estratègia feta servir en la programació ha estat identificar les entrades i sortides d'un tanc. Així si un tanc presenta una canonada d'entrada de cabal i dues canonades de sortida de cabal, s'identifica aquest tanc amb dos funcions. La primera funció permet computar l'entrada de fluït en el tanc; la segona funció permet computar la sortida de fluït a través de dues canonades. Cada funció s'escriu com a fitxer anomenat *VI* en la metodologia que es fa servir en *LabVIEW*. Aquest modelat intern permet connectar diversos *VI* internament entre si per tal de confeccionar un tanc amb les seves canonades. Aquesta metodologia s'exporta a tot el conjunt de la planta de la Figura 2.6 i a qualsevol altre configuració.

Com a exemple, és necessari crear una funció que calculi els litres que surten de un tanc en funció de l'estat de la vàlvula i del temps de mostreig, i recalculi la nova alçada del tanc (Figura 2.13):

1. Calcula els litres que conté un tanc a partir del nivell en aquell moment i la seva àrea
2. Calcula els litres que surten per el tub de sortida a partir del seu cabal i de l'estat de la vàlvula.
3. Resta els litres que han sortit dels que hi havia en el tanc
4. Recalcula el nou nivell

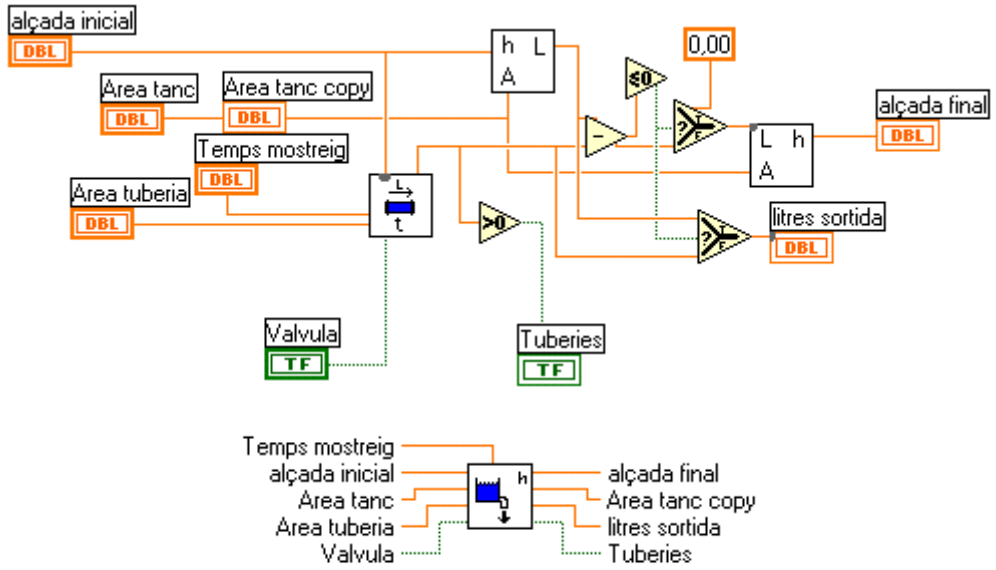

Figura 2.13 Funció: Litres que surten d'un tanc amb 1 canonada

En el cas de que el tanc tingués més d'una canonada, es posen tantes vegades la funció anterior com canonades hi hagi. Per exemple per a tres canonades (Figura 2.14):

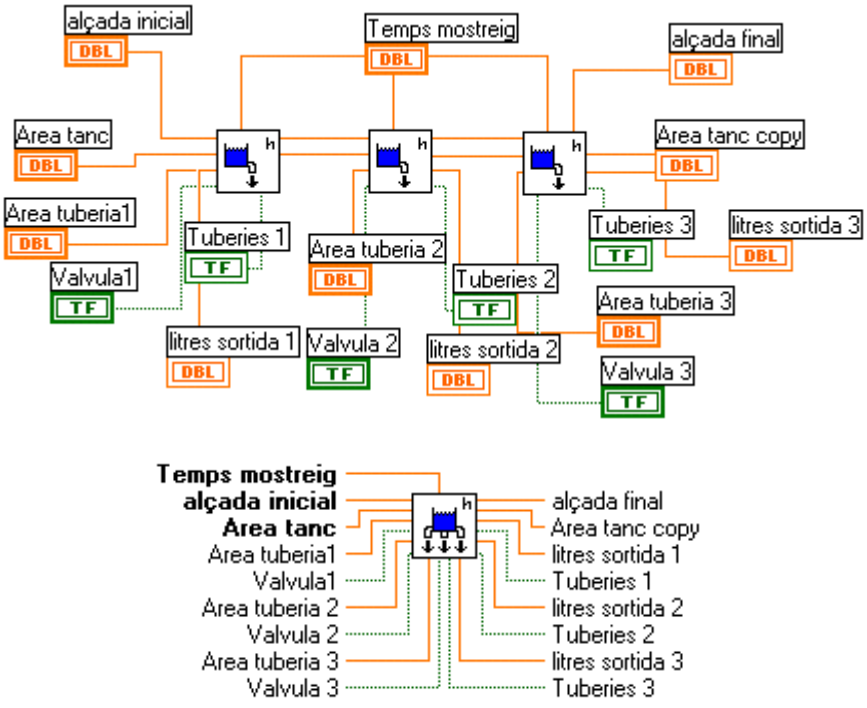

Figura 2.14 Funció: Litres que surten d'un tanc amb 3 canonades

Una vegada es tenen les funcions de sortida d'aigua del tanc, falten les d'entrada. El que fa aquesta funció és: calcula els litres que conté el tanc, els hi suma els litres que arriben del tanc origen i torna a calcular la nova alçada (Figura 2.15).

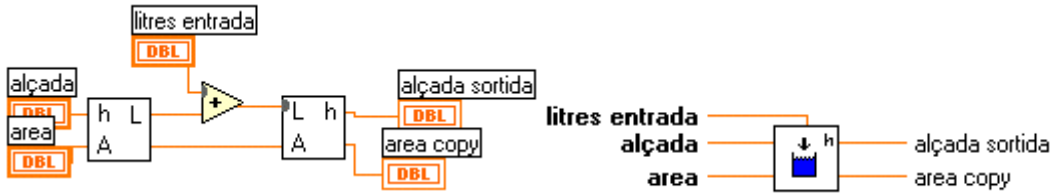

Figura 2.15 Funció: Litres que entren a un tanc amb 1 canonada

Per a més de un tub només s'ha de afegir un sumador per a cada tub. Per exemple per a 3 tubs d'entrada (Figura 2.16):

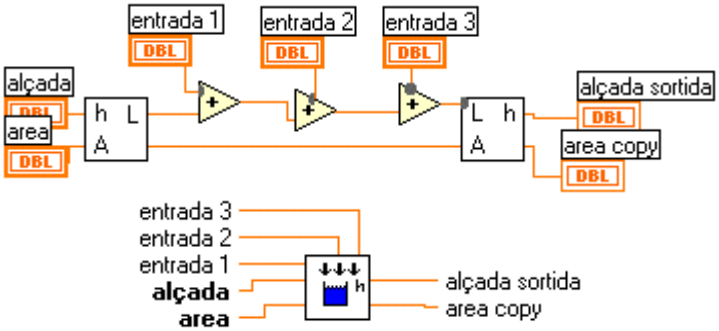

Figura 2.16 Funció: Litres que entren a un tanc amb 3 canonades

Amb les funcions creades, l'estratègia que es segueix per a la programació de cada tanc és aplicar l'expressió:

litres finals = litres inicials - litres sortida + litres entrada - litres perduts

Les funcions creades calculen aquest litres a partir del nivell i l'àrea dels tancs.

Per a restar els litres de sortida s'utilitza la funció de sortida d'una canonada , que a més de recalcular el nou nivell del tanc torna els litres que han sortit, els quals s'han de enviar a l'entrada del tanc destí. Si es te més d'una canonada, es posen varis VI's en sèrie, o un VI ja preparat amb les canonades de sortida necessàries, per exemple per a tres canonades .

Per a sumar els litres d'entrada s'utilitza la funció d'entrada d'una canonada , la qual suma els litres d'entrada d'un altre tanc als existents i recalcula el nivell. Si hi hagués més d'una canonada d'entrada, es posen varis VI's en sèrie, o un VI preparat amb les canonades d'entrada necessàries, per exemple 3 canonades .

En el cas de que es tractés d'un tanc intermig, es necessiten restar els litres que es perden en cas de omplir-se el tanc al màxim de la seva capacitat, i seguissin arribant litres. Per a

això es disposa la funció , que resta aquests litres al tanc, i els retorna. Aquests litres s'han d'enviar al tanc *virtual* de pèrdues.

Per a extreure dades, es necessita mostrejar cada cert temps les dades instantànies. Per a aquesta tasca s'utilitza el VI , que crea un *array* de dades cada interval de temps que se li indica.

Si aquestes dades es volen gravar a format .mat de Matlab, s'utilitza el VI específic , que converteix l'*array* de dades al format de Matlab (Raya 1999).

2.5.3. Creació d'interfície de treball per l'investigador

L'investigador/dissenyador necessita preparar la sessió experimental i controlar que aquesta funcioni amb correcció. El dissenyador ha de decidir:

- Valor dels paràmetres de la planta a partir de l'estudi del comportament de la planta
- Nombre de proves a realitzar
- Tipus de fitxers a enregistrar
- Tipus d'instrucció informativa i activitat presentada a l'usuari
- Interfície gràfica que es presenta a l'usuari
- Ritme d'evolució del fluït en la simulació
- Possibilitat de cooperació amb ergonomistes per realitzar una sessió experimental complerta amb estudis de personalitat i càrrega mental (Díaz et. al. 2001)

En aquest sentit s'han estudiat dues opcions:

1. Cada micro-món dissenyat presenta una pantalla prèvia de configuració només visible per al dissenyador, de manera que aquest acaba d'ultimar detalls.

2. En una sola pantalla prèvia el dissenyador decideix quin micro-món presenta a l'usuari, reduint així la memòria utilitzada per l'aplicació.

2.5.4. Creació d'interfície gràfica per a l'usuari

Així, recollint les idees desenvolupades en treballs previs (Pastor et. al. 1998), ja s'està en disposició de construir un micro-món amb cinc tancs en disposició vertical. Per això es necessita tancs, vàlvules i canonades de la llibreria d'objectes. També són necessàries les funcions d'entrada i sortida de canonades dels tancs, de pèrdues i les funcions per a gravar les dades (c. f. 2.5.2. Llibreria de funcions). Per implementar tot plegat cal unir tots els objectes i funcions mitjançant el llenguatge G de *LabVIEW*.

El micro-món que es discuteix en el present treball és un sistema dinàmic hidràulic format per 5 tancs, a diferents nivells, connectats entre sí amb canonades de diferent diàmetre (v. Figura 2.6). El pas de l'aigua a través de les canonades està regulat per vàlvules de control binàries. El tanc superior i el tanc inferior tenen la mateixa capacitat.

La interfície es pot completar amb el botó d'inici, la consigna, un rellotge indicador del temps d'execució, un sisè tanc virtual que recull l'aigua que prové del vessament en els

tancs intermitjos. Habitualment la interfície presenta una simbologia gràfica, de manera que, per exemple, els tancs no contenen cap informació numèrica sobre el nivell o la capacitat.

La forma concreta de la consigna és:

fer circular l'aigua del primer al darrer tanc en el mínim temps possible i sense vessament.

En el micro-món la persona construeix la seva pròpia solució ja que aquesta depèn de les seves pròpies accions sobre les vàlvules. En tot cas, es tracta d'un mode determinístic en el que no coexisteixen events aleatoris externs que apareguin de forma imprevisible en el desenvolupament de la prova.

2.6 Aspectes cognitius de la interacció

Un cop establerts aspectes de la dinàmica de processos hidràulics així com aspectes tècnics concrets necessaris per la simulació automàtica, cal fixar-se ara en el processament de la informació que farà l'usuari que governi el procés. Dins el processament de la informació cal destacar els aspectes de *atenció, percepció, memòria, models mentals, aprenentatge*. El tractament cognitiu de la interacció es fa imprescindible en el disseny d'interfícies orientades a l'usuari de manera que una utilització acurada dels aspectes esmentats permetrà anar més enllà de la utilització d'un programari en concret per acostar-se, un cop més, a l'inici d'aquest capítol on es tracta a l'usuari com a component del sistema. En les paraules de Ritter: els dissenyadors d'interfícies per usuari, han d'entendre i saber aplicar la psicologia rellevant en el disseny de interfícies persona-màquina (Ritter i Young 2001). Com a usuari s'entén un operari en el lloc de treball, o una persona sotmesa a les proves experimentals en el laboratori.

Atenció

El micro-món de la Figura 2.6 disposa de 5 tancs i al llarg de les proves preliminars sorgeix la pregunta de si la persona tindrà una atenció focalitzada només en els tancs intermitjos T2, T3 i T4. De fet, per sobre el conjunt de tancs la pregunta és: fixarà la persona la seva atenció en un tanc a punt de vessar?

Respecte la utilització del micro-món i l'entorn, es detecta que intentar mantenir una conversa i controlar el micro-món alhora és una doble tasca que no es pot portar a terme amb correcció. I quan s'intenta controlar tancs intermitjos que es troben als extrems del camp de visió (T2 i T4), es tenen força problemes. En canvi, la visualització de dalt a baix afavoreix seguir el curs del fluït sense problemes.

No s'ha disposat de cap informació quantitativa numèrica en pantalla, excepte en el moment de finalitzar la prova en la que s'afegeix en pantalla l'indicador de temps emprat per efectuar el darrer assaig, en els casos en que la persona repeteix la prova. Aquest indicador es consulta momentàniament entre proves i no desvia l'atenció per a la següent repetició de la prova.

Percepció
La persona fa servir visió perifèrica per captar tot el micro-món i desplaça el ratolí per tal de posicionar-se i accionar les vàlvules de control. S'ha promogut una representació causal, en el sentit de que la vàlvula tancada es representa en color vermell i la vàlvula oberta es representa en color verd. El fluït apareix de color blau, de manera que el subjecte pot associar per analogia que es pot tractar d'aigua.

Els tancs s'han representat en un model de 2D i s'entén que la persona, mitjançant les analogies pertinents, pot fer-se una representació 3D dels tancs i les canonades. En realitat aquesta representació forma part del model contructivista, que es aquella que considera que les persones elaboren la informació a partir de la imatge captada (UOC 2001).

El moviment del fluït en pantalla es actualitzat cada 0.1 segons, de manera que la persona percep un moviment continu. Es fa difícil captar el valor quantitatiu concret del nivell que hi ha en un moment donat en un tanc, però en canvi l'apreciació qualitativa no és cap problema. El moviment del fluït es percep com una tendència:

- El nivell en el tanc s'incrementa
- El nivell en el tanc decrementa
- El nivell en el tanc es manté estable

Respecte al valor qualitatiu de percepció del nivell, aquest és:

- El tanc es *buit*
- El nivell del tanc és *baix*
- El nivell del tancs és *alt,* respecte un cert llindar subjectiu d'alarma
- El tanc es *ple*

I respecte la secció de les canonades, sense conèixer el valor numèric concret, es diferencia en:

- canonada de secció *gran*
- canonada de secció *petita*

Memòria
L'any 1968, els investigadors Atkinson i Siffrin van postular el model de la memòria *multi-store* (o multiemmagatzematge) en què distingeixen tres tipus de magatzems: magatzem sensorial, magatzem de curt termini i magatzem de llarg termini (citat a UOC 2001).

De fet el magatzem sensorial ja es fa servir en el moment de la observació visual del micro-món. El magatzem de curt termini, *short term memory,* ve definit per un processament actiu de la informació i amb una capacitat d'emmagatzematge limitada en quantitat i temps. El nombre de peces d'informació que es poden guardar en aquest magatzem be donat pel nombre màgic de Miller i equival a 7 +/- 2 peces.

En el micro-món hi ha 5 tancs i 8 canonades. De fet 5 nivells d'aigua i 8 vàlvules de control. Els tancs T1 i T5 són el punt de partida i arribada de l'aigua, mentre que les vàlvules de control inferiors a T2, T3, T4 poden perfectament quedar sempre obertes ja que

per controlar el nivell d'ompliment dels tancs intermitjos és només necessari controlar la resta de vàlvules. Així , atenent al fet de que la persona pot repetir la prova i focalitzar la seva atenció, es veu que el nombre de peces d'informació del micro-món queda reduït a 3 nivells i 5 vàlvules. Aquest nombre (8 peces) està dins el límit marcat pel nombre de Miller (UOC 2001).

Respecte el magatzem de llarg termini, - aquest és conegut per *long term memory* -, la informació es guarda i esdevé coneixement. No s'entra a detallar el model concret d'aquest processament ja que relaciona el conscient i el subconscient humà, aspectes que s'escapen dels objectius d'aquest treball (Cleeremans 1993), (Cleeremans et. al. 1998).

Models mentals
La representació dels objectes creats, - vàlvules, canonades i tancs - , ajuden a formar un model mental de funcionament del sistema (Johnson-Laird 2000). A la persona no l'interessa tant l'estructura interna de la vàlvula de control, com el senzill fet de que pot accionar-la.

Ara bé, cal tenir en compte que el micro-món de 5 tancs pot ser percebut de manera diferent per les persones, de manera que sense ambigüitats cal definir:
- Lligam entre objectes gràfics
- Tipus de consigna
- Causalitat (causa: obrir vàlvula , efecte: canvi en el nivell d'aigua en el tanc)
- Restriccions (evitar el vessament)

Quan l'aplicació d'aquest conceptes porti a equívocs, - no percebre la disposició vertical, no veure diferències entre diàmetres de canonades -, la persona no podrà "entendre la planta" i només construirà models mentals parcials. Això es plasmarà en:

- Limitació en la capacitat d'utilització
- Frustració per no poder governar el procés

La tasca del dissenyador consisteix en dissenyar interfícies gràfiques de processos dinàmics amb un model conceptual que coincideixi amb algun model de la persona, o almenys amb un model conceptual i una "imatge de la planta" prou clars perquè a la persona no li costi crear-se un model mental adequat.

A tall d'exemple d'un motiu de discussió entre ususari i dissenyador es cita la mida del tanc 1 respecte la mida dels tancs intermitjos T2, T3, T4. Els usuaris opinen que per la quantitat d'aigua que es buida del tanc 1, aquest hauria d'estar representat en pantalla per una àrea molt més gran en comparació amb les àrees dibuixades dels altres tancs. La resposta a aquest punt no es pot donar a l'usuari ja que justament per engrandir la mida de T1 i T5 s'hauria de disminuir el dibuix dels tancs T2, T3 i T4 i això implica que la persona tindria dificultats per captar quan un tanc es troba en risc de vessament. Aquesta estimació subjectiva del risc és un tema força atraient per ser estudiat en psicologia social, de manera que no es vol tancar la porta a una possibilitat de recerca.

Aprenentatge
En algunes àrees metodològiques on es vol potenciar l'aprenentatge de la persona és freqüent que se li presenti una mostra del funcionament de l'instrument. Així, en la conducció de l'automòbil, l'instructor pot posar-se ell mateix al voltant per reafirmar un

comportament adequat de la conducció; en el cas de la indústria, un operari experimental pot mostrar a un operari novell com s'ha de governar una màquina.

En el micro-món, s'ha prescindit de mostrar directament a la persona com es podria fer la prova. Es prefereix que la persona repeteixi diverses vegades la prova, de manera que la primera prova es de tempteig. El subjecte aprèn mentre ho fa, es el que s'anomena *learning by doing,* i es inevitable que apareguin errors. Justament aquest procediment permet hipotetitzar sobre la minimització del nombre d'errors al repetir la prova ja que la persona disposa de mecanismes de retroalimentació que li permeten examinar la pròpia conducta passada i la manera com hi va arribar, i d'ajustar la conducta futura i la presa de decisions tenint en compte aquest èxits o fracassos parcials (Díaz 2000). En aquest context, *aprenentatge* s'entén com a canvi permanent en la conducta.

Respecte al nombre d'errors i a l'execució incorrecta d'algunes vàlvules, - com per exemple tancar una vàlvula inferior als tancs intermitjos -, s'ha de dir que la planta creada presenta una certa tolerància amb els errors. Per molt mala actuació, - vessament de tancs T2, T3 i T4-, sempre es pot reconduir la situació tancant les vàlvules superiors i això es pot fer dins l'escala de temps dissenyada.

El micro-món presenta una estructura determinista de manera que no s'ha afegit el cas de situació irreversible catastròfica. . Aquesta situació s'hauria de tenir en compte en el cas de dissenyar interfícies més complexes, amb presència de fets aleatoris com trencament de components o presència de pertorbacions.

Així, una idea fonamental que es presenta en el procés d'aprenentatge és que davant el control d'un micro-món de complexitat mitjana, el procediment d'assaig i error no li funcionarà a la persona en els primers assaigs ja que no és segueix la consigna. I no es segueix la consigna en primer lloc perquè la persona reaccionarà lentament, i en segon lloc perquè la velocitat del fluït s'ha d'inferir després d'obrir diverses vàlvules referides a canonades de diàmetres diferents. O sigui, que el micro-món, juntament amb la repetició de la prova, està dissenyat per facilitar l'aprenentatge de la persona. I està dissenyat de manera que per tal de que la persona intenti seguir la consigna, es necessari el canvi de mètode inicial d'assaig/error pel mètode posterior de desenvolupament d'estratègies.

2.7 En resum

Per tal de concloure el capítol, s'ha de resumir que s'ha optat per efectuar un disseny que parteix de l'estudi de camp i s'acosta a la recerca de laboratori. En primer lloc es presenta la relació entre el diagrama de decisió provenint de l'estudi de camp de Rasmussen i el micro-món de 5 tancs com a instrument de mesura de laboratori. Qualsevol pas en sentit contrari, o sigui qualsevol adaptació del micro-món a un entorn de treball específic implica adoptar el punt de vista de la *recerca ecològica* on es te molt en compte l'entorn de l'operari, - això escapa als objectius d'aquest treball -. En tot cas, es vol posar de manifest les coincidències metodològiques entre l'enginyeria de processos cognitius i la utilització de micro-mons.

En segon lloc indicar que en l'adequació de micro-mons en la supervisió de processos s'ha fet una arquitectura jeràrquica:

- Nivell I: Estudi de camp
- Nivell II: Modelat temporal de la interacció
- Nivell II: Modelat dinàmic de la planta
- Nivell IV: Micro-món com a entorn dinàmic simulat

Els dos primers nivells són genèrics mentre que els dos darrers nivells són escenificacions concretes.

A destacar els aspectes cognitius de la interacció. Aquí es mesclen aspectes com aptituds personals davant el repte de solucionar problemes i habilitat per portar a terme la solució, amb altres factors associats amb la representació de la informació en la interfície gràfica que permeten a l'usuari formar-se els models mentals adequats. Sense una interfície entenedora es fa difícil copsar l'aprenentatge de l'usuari cap a comportaments elaborats.