

APLICACIÓ D'UN SISTEMA INTEL·LIGENT PER AL CONTROL D'UNA ESTACIÓ DEPURADORA D'AIGÜES RESIDUALS

I. R. Roda*, M. Sànchez*, J. Lafuente^δ, V. Cortés* i M. Poch*

* Univ. de Girona. Laboratori Eng. Química i Ambiental, campus Montilivi, 17071 Girona, Spain

* Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Llenguatges i Sistemes informàtics. Jordi Girona, 1-3, 08034 Barcelona, Spain

^δ Universitat Autònoma de Barcelona. Dept. Enginyeria Química. 08193 Bellaterra, Spain

RESUM

A l'article es mostren els avantatges potencials que resulten de l'aplicació de tècniques avançades d'intel·ligència artificial per al control d'un procés biotecnològic complex com el de les estacions depuradores d'aigües residuals urbanes. Es presenta l'estructura d'un sistema que integra tota la informació que es pot arribar a recollir en una planta de tractament (dades de sensors, analítiques de laboratori i observacions qualitatives) i combina tècniques de control clàssic (modelització i simulació) amb aproximacions intel·ligents (sistemes basats en coneixement i en casos), per tal de diagnosticar l'estat de la planta i oferir-li un pla d'actuació.

RESUMEN

En el artículo se muestra el potencial que ofrece la aplicación de herramientas avanzadas del campo de la inteligencia artificial para el control de un proceso biotecnológico complejo como el que conforman las plantas de tratamiento de aguas residuales. Se presenta la estructura de un sistema que integra toda la información que se recoge habitualmente en una depuradora (datos de sensores *on-line*, analíticas en el laboratorio y observaciones cualitativas) y combina técnicas de control clásico (modelización y simulación) con aproximaciones inteligentes (sistemas basados en conocimiento y basados en casos), con el objetivo de diagnosticar el estado de la planta y ofrecer un plan de actuación adecuado.

ABSTRACT

The management, control and supervision of a wastewater treatment plant (WWTP) is a very complex and dangerous task, due to the features of a WWTP and to the catastrophic consequences that can be achieved by an incorrect operation. Usual used techniques, like numerical control algorithms, are not able to control the WWTP if it is not operating in normal conditions. They need the integration of other techniques that allow to include the expert knowledge provided by the WWTP's operators and literature, and the experiential knowledge acquired in the past operation of the WWTP under supervision. A supervisory system, called DAI-DEPUR, is showed as an efficient approach to the problem. The presented architecture is the result of the integration of several Artificial Intelligence techniques with some Control Engineering methods, and with some Chemical Engineering techniques: numerical control methods, chemical engineering models, rule-based reasoning, case-based reasoning, knowledge acquisition, learning, and data gathering. The global issue of supervision is carried out in a distributed way by means of several tasks: system evaluation, local diagnosis of subsystems, adaptation, global diagnosis, supervision, operator's validation, and actuation. The expert knowledge is distributed among several knowledge bases that cooperate for the global supervisory task. At the end of the paper, an example of application is detailed, in order to outline the global supervisory process where interact the several techniques implemented, the process (WWTP), and the plant operator through several interfaces.

Keywords: Artificial Intelligence, Case-based system, Control, Knowledge-based system, Learning, Knowledge acquisition, Wastewater treatment plant

INTRODUCCIÓ

A fi d'evitar els efectes nocius per a la natura i la salut humana, cal tractar tot tipus de residus provocats per acumulacions de persones o activitats. En el cas que l'aigua residual no es tracti i es deixi estancada durant un cert període de temps, la descomposició de la matèria orgànica que conté pot arribar a produir gran quantitat de gasos pudents i augmentar els nombrosos microorganismes patògens per a la vida humana i animal, amb el consegüent risc potencial d'infecció. També sol presentar nutrients, responsables de creixements explosius de les plantes aquàtiques que priven els peixos de l'oxigen necessari per respirar, i finalment, pot incloure substàncies tòxiques com mercuri, zinc, etc (1). Aquestes característiques fan totalment inviable que l'ecosistema assimili sense conseqüències negatives tota aquesta massa d'aigua contaminada. És aleshores que l'home, responsable únic i directe d'aquesta degradació de l'entorn natural, es veu obligat a fer-hi alguna acció que restableixi l'equilibri natural o, si més no, que minimitzi l'impacte de la seva frenètica activitat industrial. De fet, la Directiva 91/271/CEE estableix una seqüència cronològica de prioritats en les actuacions de sanejament i depuració, el límit de les quals se situa al 31 de desembre de l'any 2005.

Aquest fet ha suposat una aparició massiva d'estacions depuradores d'aigües residuals urbanes (EDAR) a Catalunya. L'objectiu de tota EDAR és reduir el contingut de contaminants de les aigües provinents de les poblacions veïnes, per tal d'abocar posteriorment aquestes aigües ja tractades a algun medi receptor (principalment rius o mar) on es pugui finalitzar la depuració d'una manera natural. Tot i la gran diversitat de configuracions i tractaments, una EDAR sol constar d'un pretractament (on d'una manera física s'eliminen els sòlids més grossers, les sorres i els greixos), un tractament primari (on físicament, i a vegades químicament, se separa per decantació la matèria orgànica sedimentable) i un tractament secundari (principalment biològic, encarregat d'eliminar la matèria orgànica soluble i els nutrients). El procés provoca l'aparició d'un subproducte de tipus orgànic, anomenat fang o llot, que es tracta per separat en una línia que pretén espesseir-los, estabilitzar-los i deshidratar-los.

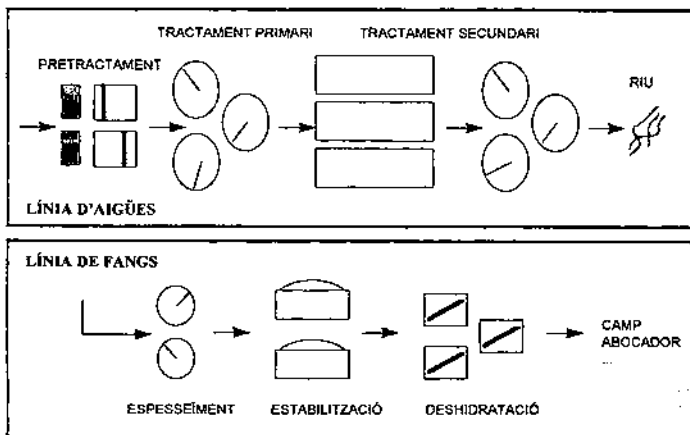


Figura 1. Esquema principal d'una EDAR.

Control del procés

L'exploració de les EDAR exigeix l'aplicació de criteris d'optimització que permetin assolir els límits legals d'abocament fixats per la normativa, però sempre sota un criteri comprensible de minimització de costos. El problema és que el procés presenta unes característiques que en dificulten enormement el control:

- L'etapa principal del procés és de tipus biològic. Això implica que la principal responsable de l'eficàcia en la depuració és una població multiespecífica d'éssers vius que actua en funció d'un munt de variables desconegudes per nosaltres.
- El coneixement que es té del procés està molt poc estructurat. Les relacions entre les diferents variables que hi intervenen no estan perfectament establertes, i només es disposa d'estudis i aproximacions a certs fenòmens.
- L'entrada de la planta no es pot controlar. A l'inrevés que a la majoria de processos industrials on escollim tipus i quantitat de reactius, a una EDAR hi arriben un cabal i uns nivells de contaminants absolutament variables. Això comporta que les condicions d'operació siguin de tipus dinàmic i que el procés mai no treballi sota règim d'estat estacionari.
- El procés viu freqüents episodis extraordinaris que encara en dificulten més la gestió. Per episodi extraordinari s'entenen xocs de cabal deguts a tempestes sobtades, abocaments puntuals de tipus industrial que posen a prova la resistència de la fauna desenvolupada, etc. Tot i que s'ha fet esment a la no-estacionaritat del procés, quan la planta treballa en règim de normalitat pot ser operada correctament i, fins i tot, es pot arribar a modelitzar el seu comportament. No obstant això, qualsevol d'aquestes tècniques clàssiques de control fallen estrepitosament quan han de fer front a situacions no previstes prèviament.
- Molta de la informació amb què es treballa a la planta és de tipus qualitatiu, corresponent a observacions dels operadors o del mateix cap de planta. Moltes vegades aspectes com l'olor o el color de l'aigua, o observacions de tipus microscòpic dels microorganismes presents, és de vital importància a l'hora de determinar l'estat de la planta.
- Hi ha una mancança de sensors en línia que permetin conèixer a l'instant les característiques de l'aigua a diferents punts del procés. A més, aquests sensors són poc fiables i de variables massa globals. Podem conèixer el valor d'oxigen dissolt als bioreactors on es produeix la degradació de matèria orgànica, però l'agrupació en floculs dels microorganismes provoca l'existència d'uns microclimes dels quals desconcixem absolutament les condicions d'oxigenació.
- Hi ha un retard important en l'analítica de diferents paràmetres al laboratori. Fan falta més de dues hores per conèixer el valor de matèria orgànica químicament degradable, i fins a 5 dies per conèixer-ne la biodegradabilitat.

Amb totes aquestes limitacions i la poca informació recollida, el cap de planta ha de garantir un bon grau de depuració de les aigües residuals. Moltes vegades és l'ús de la seva experiència i del coneixement heurístic acumulat al llarg dels anys el que li permet reconduir el procés satisfactòriament.

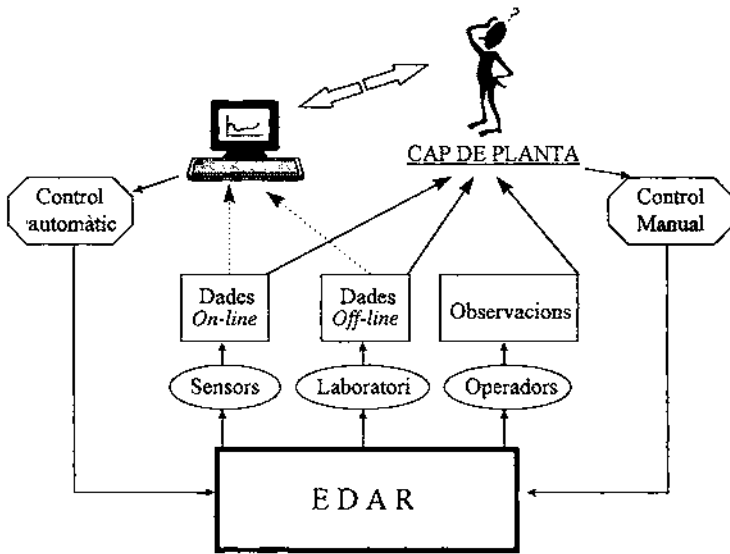


Figura 2. Control actual d'una EDAR.

El fet que l'experiència humana sigui tan determinant per a la bona gestió d'una EDAR fa pensar que l'aplicació d'un control de tipus intel·ligent pot complementar i millorar els resultats d'un control clàssic i numèric. Parlar de control intel·ligent obliga a fer referència al món de la intel·ligència artificial (IA), camp de la ciència computacional relacionat amb l'enteniment de conceptes i mètodes del raonament humà, així com l'aplicació d'aquest coneixement al desenvolupament de programes que mostrin un comportament intel·ligent (2). Hi ha diferents aproximacions d'estudi dins la IA, entre les quals trobem els paradigmes basats en el coneixement (sistemes experts), els basats en models (models causals), els basats en l'experiència (sistemes basats en casos), els paradigmes connexionistes (xarxes neuronals) o els paradigmes evolutius (algoritmes genètics).

Sembla que un salt qualitatiu en la gestió òptima de les EDAR és l'aplicació de sistemes basats en el coneixement (KBS), ideals per al control de processos poc estructurats i complexos, i especialment potents en la incorporació de coneixement no algorítmic, subjectiu, simbòlic i poc definit. Un KBS és un programa informàtic que pretén resoldre problemes complexos i concrets, i emula la capacitat intel·ligent que mostra l'home per raonar. Per fer-ho, un KBS necessita una gran quantitat de coneixement, normalment estructurat en forma de regles dins la **base de coneixement**, a més d'un mecanisme d'inferència o **shell**, que és el programari encarregat de controlar les operacions de raonament, activant en cada moment el coneixement que és estrictament necessari per resoldre cada situació concreta. El fet d'estructurar el coneixement en forma de regles d'inferència permet al sistema deduir noves conclusions partint de diferents premisses o condicions (IF <condicions> THEN <conclusions>).

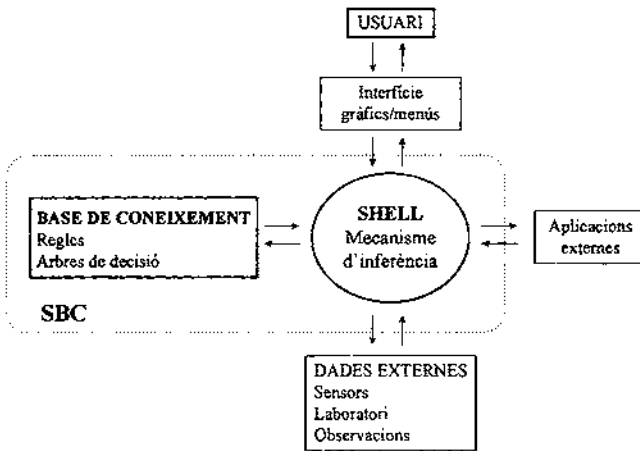


Figura 3. Estructura principal de l'aplicació d'un KBS.

Com que és una tecnologia emergent i força nova, encara trobem pocs exemples d'aplicacions de KBS en el camp del tractament d'aigües residuals (3, 4, 5 i 6).

Estructura del sistema

Es presenta seguidament l'estructura proposada per a l'establiment d'un sistema intel·ligent capaç de gestionar d'una manera fàcil, ràpida i eficaç el procés de depuració portat a terme en una EDAR. El sistema, anomenat DAI-DEPUR (7, 8), integra diferents aproximacions a la resolució del problema; d'una banda, un sistema basat en el coneixement desenvolupat sobre G2, una *shell* o mecanisme d'inferència comercial (9), que inclou tot el coneixement extret dels experts del procés, de llibres o manuals, i de processos de classificació de dades històriques de la planta en estudi; d'altra banda, un sistema basat en casos (SBC), que permet enriquir el coneixement que es té del procés i aprendre a partir de les experiències viscudes en el dia rere dia d'operació de la planta; i finalment, l'aproximació més habitual de tipus numèric que, a més de controlar els petits llaços de control quan la planta no viu cap episodi de anormalitat, permeti simular les conseqüències de les possibles accions de control proposades per DAI-DEPUR.

Sistema basat en coneixement

El principal coll d'ampolla en el desenvolupament d'un KBS és l'adquisició i estructuració del coneixement necessari per construir la seva base de coneixement. Precisament s'ha especificat que se sol aplicar en camps on el coneixement és poc clar, molt subjectiu, i en possessió d'un reduït grup d'experts. De cara a construir aquesta base de coneixement cal disposar de tota la informació possible. Si bé és cert que dels llibres especialitzats, manuals i articles de recerca se'n pot extreure molt de coneixement de tipus general, aquest sempre serà poc específic de cara a la resolució de problemes concrets de cada EDAR en particular. Per aquesta raó convé que, en la construcció de les regles que conformen els arbres de decisió de la base de coneixement, aparegui coneixement implícit de l'EDAR en qüestió.

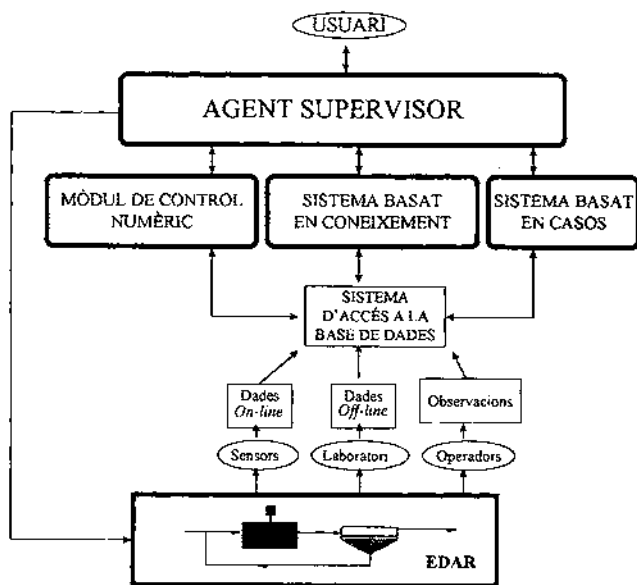


Figura 4. Estructura de DAI-DEPUR.

La forma habitual d'extreure aquest coneixement sol consistir en l'establiment d'una sèrie de converses amb el cap de planta i els seus operaris. En aquests casos succeeix que s'obté informació molt subjectiva, inconsistent i incompleta, i és un dels punts on es fa més evident la paradoxa de l'expert, que remarca que precisament la persona que més sap d'un tema és la que troba més dificultats per expressar exactament els mecanismes de raonament seguits per tal d'enfrontar-s'hi amb èxit.

Per evitar aquestes limitacions que presenten els sistemes clàssics d'adquisició de coneixement particular, la intel·ligència artificial proposa noves tècniques automàtiques, entre les quals hi ha **Linneo**. **Linneo** és un *software* desenvolupat a la UPC per a la classificació heurística i la generació automàtica de regles que utilitza tècniques analítiques i empíriques d'adquisició del coneixement (10). El seu ús permet la construcció d'una sèrie de regles estructurades en arbres de diagnosi que inclouen el coneixement específic que s'extreu del conjunt de dades històriques de la planta en estudi.

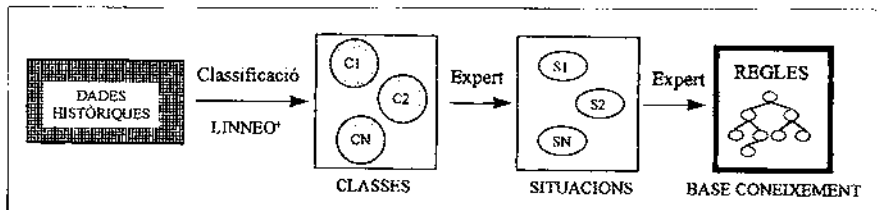


Figura 5. Procés de classificació amb Linneo.

Finalment, tot el coneixement del procés, sigui general o específic, ha de quedar estructurat dins una complexa base de coneixement que pot comprendre diferents mòduls que incloguin exclusivament aquell coneixement que fa referència a una unitat concreta del procés, com ara el decantador primari, les basses d'activació o un mòdul particular d'ajuda a la diagnòsi de bacteris filamentosos. A la figura següent es mostra un exemple d'arbre de decisió referent als problemes típics d'un decantador primari d'una EDAR (11).

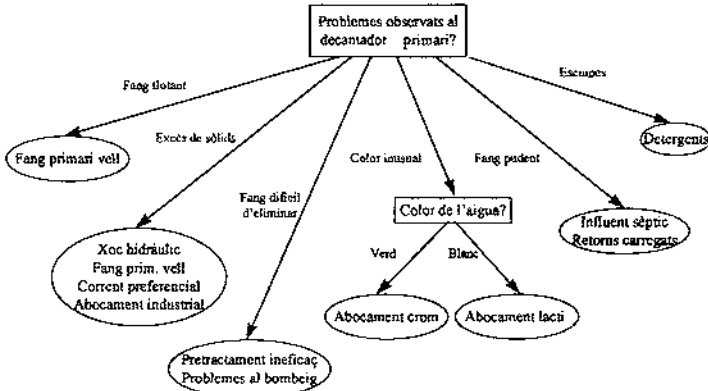


Figura 6. Arbre de diagnòsi corresponent a la decantació primària.

Sistema basat en casos

Un SBC estructura el coneixement mitjançant casos o experiències. S'entén per cas cada nova situació produïda a l'EDAR, i es defineix en funció dels valors que prenen les variables rellevants del procés. Aquest conjunt de casos queda emmagatzemat dins una base de casos, conjuntament amb el pla d'actuació específic per a cada situació i l'avaluació que es fa dels resultats obtinguts (èxit o fracàs de l'acció de control). La principal virtut d'un sistema basat en casos és que permet capturar i organitzar experiències viscudes, a més de garantir una millor resposta davant situacions noves, ja que evita l'errada sistemàtica d'un sistema que no enriqueixi el seu coneixement amb el temps.

De cara al seu funcionament, el SBC estableix un procés cíclic que analitza els valors que han pres les variables utilitzades per a la definició del cas, amb la finalitat de concloure la situació viscuda per la planta. D'entre el conjunt de casos enregistrats a la base de casos, es busquen els més semblants i s'escull finalment el més proper. En funció d'un criteri preestablert de similitud, es decideix si el cas és prou proper per aplicar-hi el pla d'actuació definit (es preveu la possibilitat d'una petita adaptació d'aquesta actuació) o si, per contra, ens trobem davant una situació encara no viscuda a l'EDAR i que per tant cal incorporar com a nova experiència dins la base de casos. Aquest últim punt, juntament amb l'avaluació enregistrada que fa el cap de planta, és el que suposa l'aprenentatge del sistema.

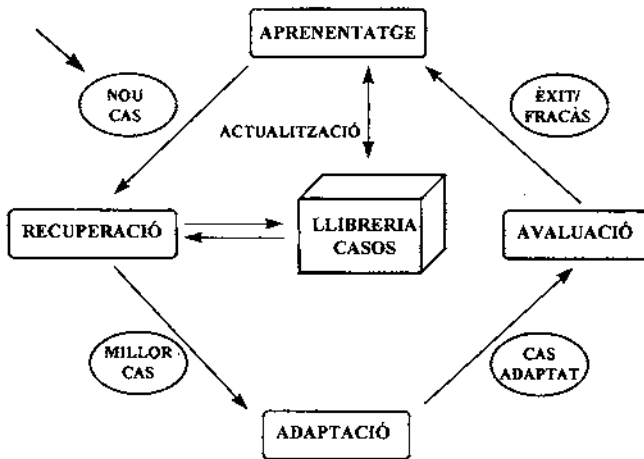


Figura 7. Procés iteratiu d'un SBC.

Estudi d'un cas.

Amb la finalitat de mostrar-ne el funcionament, es presenta seguidament un exemple d'aplicació del sistema davant una situació habitual a les EDAR catalanes. De cada nou cicle supervisor fixat, DAI-DEPUR avalua tota la informació recollida pel sistema. S'inicia una diagnosi local dels diferents KBS en què està subdividit el coneixement heurístic. Suposem que el KBS local de la decantació secundària detecta que la concentració de sòlids en suspensió a l'efluent és alta, mentre que la resta de KBS locals no detecten cap altra anomalia a la planta, tret d'un lleuger augment de l'edat cel·lular (8,9 dies), ja que l'eficàcia d'eliminació de matèria orgànica és normal (92,8%), els valors de contaminants a l'entrada són normals i la temperatura de l'aigua (17 °C) i el valor d'oxigen dissolt a les basses són normals també.

Paral·lelament, el SBC busca i recupera, d'entre tots els casos continguts a la base de casos, la situació històrica més semblant a la produïda en aquests instants. Concretament, a l'estiu de 1991, la planta va viure un episodi semblant a causa d'un abocament puntual d'amoni d'una indústria propera, que, combinat amb una edat cel·lular elevada (9,4 dies) i una alta temperatura del licor mescla als bioreactors (20°C), va provocar la sobtada aparició de bombolles de nitrogen als decantadors secundaris. Aquest fenomen, anomenat *rising* o desnitrificació incontrolada, provoca un arrossegament de la biomassa cap a la superfície del decantador i, en cas que no existeixi un bon equip de recollida de flotants, s'escapa una part de la biomassa amb l'efluent, amb el consegüent augment del valor de sòlids en suspensió a la sortida del procés. En aquest cas històric recuperat, no va ser necessària cap acció de control, ja que l'abocament i els seus efectes van ser de tipus puntual.

L'agent supervisor és l'encarregat de combinar la informació provinent dels dos mòduls. En aquest cas existeix un acord de diagnosi. La sospita és que la planta viu una situació de *rising*. L'amoni, variable no mesurada habitualment a l'influent, es pot convertir fàcilment en nitrats en les condicions de l'exemple (temperatura i edat cel·lular elevades, oxigen dissolt suficient), mentre que aquests nitrats poden con-

vertir-se parcialment en nitrogen gasós sota condicions d'anòxia als decantadors secundaris. Aquest nitrogen és el responsable de l'aparició de bombolles que fa surar la biomassa. Per confirmar la hipòtesi el sistema pot interactuar amb l'operador de la planta per requerir certes mesures analítiques al laboratori (amoni a l'entrada i sortida del procés) o observacions a la planta (bombolles a la V30 o als decantadors secundaris).

Un cop identificada finalment la situació, aquesta és comunicada al cap de planta: "Situació de *rising* és molt possible". Per tal de validar-la, el sistema pot mostrar el camí seguit a la inferència de la situació, les regles heurístiques activades, el cas històric recuperat, qualsevol mena de simulació produïda pel mòdul de control numèric, etc.

Finalment, el pla d'actuació és proposat:

- Augment del cabal de recirculació per tal de reduir la quantitat de fangs emmagatzemats als decantadors secundaris.
- Augment del cabal de purga per tal de disminuir l'edat cel·lular dels microorganismes presents i provocar un rentat dels bacteris nitrificants.
- Augment del punt de consigna de l'oxigen dissolt als bioreactors que incrementin la quantitat d'oxigen residual al licor mescla i evitin les condicions anòxiques al decantador secundari.

Bibliografia

- (1) METCALF & EDDY INC. 1991. *Wastewater Engineering: treatment / disposal / reuse*. Mc Graw-Hill, 3a edició.
- (2) FINN, G. 1989. Applications of Expert Systems in the Process Industry. A: Patry, G. and Chapman, D. *Dynamic Modeling and Expert Systems in Wastewater Engineering*. Lewis Publishers, Inc. Michigan pàg. 166-192.
- (3) KROVIDY, S., WILLIAM, G.W., SUIDAN, M., SUMMERS, R.S., COLEMAN, J. And ROSSMAN, L. 1994. Intelligent Sequence Planning for wastewater Treatment Systems. *IEEE Expert*. Desembre:15-20.
- (4) BARNETT, M.W., PATRY, G.G., TAKACS, I. i GALL R.A. 1993. A model-based expert system for the activated sludge separation: expert system design. *Water Environment Federation 66th Annual Conference & Exhibition*. Alexandria, pàg. 1-10.
- (5) LADIGES, G. i KAYSER, R. 1993. On-line and off-line expert systems for the operation of wastewater treatment plants. *Wat. Sci. Tech.*, 28(11-12):315-323.
- (6) LAPOINTE, J., MATCOS, B., VEILLETE, M. i LAFLAMME, G. 1989. Bioexpert - an expert system for wastewater treatment process diagnosis. *Computers chem. Engng.* 13(6):619-630.
- (7) SÀNCHEZ, M., CORTÉS, U., LAFUENTE, J., R.-RODA I. i POCH, M. 1996. DAI-DEPUR: an integrated and distributed architecture for wastewater treatment plants supervision. *Artificial Intelligence in Engineering*. 10:275-285.
- (8) SÀNCHEZ, M., CORTÉS, U., R.-RODA I. i POCH, M. 1995. Integrating general expert knowledge and specific experimental knowledge in WWTP. *IJCAI-95 Workshop on Artificial Intelligence and the Environment*. Montreal, pàg. 75-81.
- (9) GENSYM 1990, *G2 Reference Manual*. Gensym Corporation, Cambridge.
- (10) BÉJAR, J. i CORTÉS, U. 1992. Linneo+: herramienta para la adquisición de conocimiento y generación de reglas de clasificación en dominios poco estructurados. *Actas*

3er Congreso Iberoamericano de Inteligencia Artificial (IBERAMIA-92). L'Havana: 471-481.

- (11) GALL, B. i PATRY, G. 1989. Knowledge-based system for the diagnosis of an activated sludge plant. A: Patry, G. and Chapman, D. *Dynamic Modeling and Expert Systems in Wastewater Engineering*. Lewis Publishers, Inc. Michigan, pàg. 193-240.